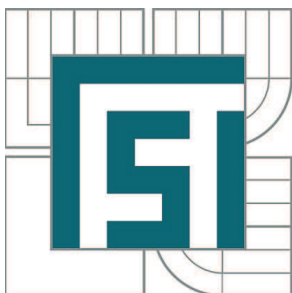


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VÝZKUM, OPTIMALIZACE A ZAVEDENÍ VÝROBY TĚŽKÝCH ODLITKŮ Z VYSOKOLEGOVANÝCH LITIN

RESEARCH, OPTIMIZATION AND STARTING THE PRODUCTION OF HEAVY HIGH-ALLOY  
CAST IRONS

DIZERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. VÁCLAV KAŇA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV ŠENBERGER,  
CSc.

BRNO 2012



## ABSTRAKT

Práce se zaměřuje především na metalurgické problémy související s výrobou odlitků o hmotnosti přibližně 1 až 40 tun z vysokolegovaných austenitických niklových litin, které jsou také známy pod obchodním jménem Ni-resist. Hlavním cílem je ověřit a doplnit poznatky o výrobě těžkých odlitků z ANL v oblasti řízení odpichové a lící teploty, řízení obsahu uhlíku s ohledem na predikci eutektického složení a v oblasti nastavení vhodného chemického složení litiny s ohledem na vznik chunky grafitu a stabilitu austenitické matrice a dále také možnosti filtrace litiny během odlévání odlitků. Na základě provedených experimentů byly stanoveny vzorce umožňující výpočet eutektické teploty a teploty likvidu na základě chemického složení litiny. Bylo porovnáno a zhodnoceno použití několika vzorců uváděných v literatuře pro výpočet uhlíkového ekvivalentu austenitických niklových litin.

Pro praktické využití zjištěných výsledků byl sestaven výpočetní program umožňující použití ve výrobní praxi. Tento program nese název *Výpočet lící teploty litin Ni-resist*. Po zadání chemického složení tavby program vypočte všechny důležité parametry, které je pro výrobu jakostních odlitků z austenitických niklových litin nutno znát a řídit. Mezi tyto parametry patří eutektická teplota, teplota likvidu a na jejím základě pak teploty odpichová a lící. Dále pak eutektická koncentrace uhlíku, uhlíkový ekvivalent, niklový ekvivalent a kritérium posuzující nebezpečí vzniku chunky grafitu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Ni-resist, austenitické niklové litiny, teplota likvidu, eutektická teplota, eutektická koncentrace uhlíku, uhlíkový ekvivalent, filtrace

## ABSTRACT

The work is particularly aimed at metallurgical problems connected with manufacture of castings of weight about 1 up to 40 tons from high-alloy austenitic nickel cast irons also known under the trade name Ni-resist. The main aim is to check and complement the knowledge about manufacture of heavy castings from austenitic nickel cast irons in a field of control of tapping and casting temperature, carbon content control with regard to the prediction of eutectic composition and in a field of setting a suitable chemical composition of cast iron with regard to the formation of chunky graphite and stability of the austenitic matrix and further on also possibilities of cast iron filtration during pouring the castings. Based on done experiments the formulae were determined that enable to calculate eutectic and liquidus temperatures on the basis of chemical composition of the cast iron. The use of several formulae given in the literature for calculating the carbon equivalent of austenitic nickel cast irons was compared and evaluated.

For utilization of determined results in practice a calculating programme has been compiled making possible to be used in operational practice. This programme is named *Calculation of casting temperature of Ni-resist cast irons*. After the entry of the melt chemical composition the programme calculates the all important parameters necessary to know and to be controlled for manufacture of high quality castings from austenitic nickel cast irons. Eutectic temperature, liquidus temperature and then based on it the tapping and casting temperatures are included among those parameters. Further on there are eutectic concentration of carbon,

carbon equivalent, nickel equivalent, and a criterion evaluating a danger of chunky graphite formation.

## **KEY WORDS**

Ni-resist, austenitic nickel cast iron, liquidus temperature, eutectic temperature, eutectic concentration of carbon, carbon equivalent, filtration



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KAŇA, V. *Výzkum, optimalizace a zavedení výroby těžkých odlitků z vysokolegovaných litin*. Brno, 2012. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, odbor Slévárenství. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto dizertační práci vypracoval samostatně s použitím citované literatury a zdrojů uvedených v seznamu, jenž je součástí této práce, dále na základě provedených experimentů a za podpory školitele.

V Brně 8.8.2012

.....  
Václav Kaňa

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat především svému školiteli doc. Ing. Jaroslavu Šenbergerovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a připomínky a také za trpělivost při mém řešení této práce. Svými radami či pomocí při experimentech dále přispěli také Ing. Antonín Záděra, Ph.D., Ing. Jan Čech, Ing. Jaroslav Laštovica a Ondřej Štoček. Při statistickém zpracování dat a při sestavování počítačového programu významně pomohli doc. RNDr. Zdeněk Karpíšek, CSc., doc. RNDr. Bohumil Maroš, CSc. a Ing. Karel Martišek. Zvláště bych chtěl poděkovat také doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc. za poskytnutí času pro dokončení této práce.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>2</b>	<b>CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>3</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>- 11 -</b>
3.1	AUSTENITICKÉ NIKLOVÉ LITINY .....	- 11 -
3.1.1	Chemické složení ANL .....	- 11 -
	Problematika vzniku chunky grafitu.....	- 15 -
3.1.2	Mechanické vlastnosti ANL.....	- 17 -
	Vliv chemického složení na mechanické vlastnosti.....	- 18 -
	Vliv tloušťky stěny na mechanické vlastnosti .....	- 20 -
3.1.3	Základní vlastnosti a použití ANL .....	- 21 -
3.2	STANOVENÍ TEPLoty LIKVIDU A EUTEKTICKÉ TEPLoty .....	- 22 -
3.3	STANOVENÍ EUTEKTICKÉ KONCENTRACE UHLÍKU .....	- 28 -
3.4	FILTRACE ANL.....	- 32 -
3.4.1	Mechanismy filtrace.....	- 32 -
3.4.2	Základní druhy filtrů .....	- 33 -
	Ploché filtry.....	- 34 -
	Objemové filtry .....	- 35 -
<b>4</b>	<b>METODIKA MĚŘENÍ A PODMÍNKY EXPERIMENTŮ .....</b>	<b>- 38 -</b>
4.1	ZKUŠEBNÍ ODLITEK .....	- 40 -
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>- 42 -</b>
5.1	EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ VLIVU C, Ni A Si NA TEPLotu LIKVIDU A EUTEKTICKOU TEPLotu .....	- 42 -
5.1.1	Experimentální stanovení vlivu C na teplotu likvidu a eutektickou teplotu.....	- 42 -
5.1.2	Experimentální stanovení vlivu Ni na teplotu likvidu a eutektickou teplotu.....	- 44 -
5.1.3	Experimentální stanovení vlivu Si na teplotu likvidu a eutektickou teplotu .....	- 46 -
5.2	STANOVENÍ SPOLEČNÉHO VLIVU C, Si A Ni NA TEPLotu LIKVIDU A EUTEKTICKOU TEPLotu .....	- 50 -
5.3	STANOVENÍ VLIVU C, Ni A Si NA TEPLotu LIKVIDU A EUTEKTICKOU TEPLotu POMOCÍ STATISTICKÉHO PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTU .....	- 52 -
5.4	STANOVENÍ UHLÍKOVÉHO EKVIVALENTU A EUTEKTICKÉ KONCENTRACE UHLÍKU .....	- 55 -
5.4.1	Uhlíkový ekvivalent ANL .....	- 55 -
5.4.2	Eutektická koncentrace uhlíku .....	- 58 -
5.5	PROGRAM „VÝPOČET LICÍ TEPLoty LITIN Ni-RESIST“ A NÁVOD K JEHO OVLÁDÁNÍ ..	- 60 -
5.6	FILTRACE ODLITKŮ Z ANL .....	- 62 -
5.6.1	Pozorování světelným mikroskopem .....	- 63 -
5.6.2	Pozorování rastrovacím elektronovým mikroskopem.....	- 64 -
5.6.3	Diskuze výsledků filtrace ANL .....	- 72 -
<b>6</b>	<b>SHRnutí PRÁCE .....</b>	<b>- 73 -</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>- 76 -</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>- 78 -</b>
<b>9</b>	<b>POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY.....</b>	<b>- 79 -</b>

# 1 ÚVOD

Tato práce je řešena jako dílčí část projektu MPO TANDEM, ev. č. FT-TA3/007 „Výzkum a optimalizace výroby vysokolegovaných litin pro odlitky“, jehož hlavním řešitelem je Žďas a.s. a spoluřešitelem Vysoké učení technické v Brně. Po ukončení tohoto projektu práce pokračovala upřesněním některých technologických parametrů výroby vysokolegované litiny pro těžké odlitky.

Pod pojmem vysokolegované litiny se skrývá nepřeberné množství materiálů, jež lze dále rozdělovat podle několika různých hledisek. Těmito hledisky mohou být např. dělení dle hlavního legujícího prvku (litiny legované chromem, niklem, křemíkem, atd.), dle morfologie vyloučeného grafitu (litiny s lupínkovým grafitem, s kuličkovým grafitem, atd.), dle struktury základní kovové matrice (feritické litiny, austenitické litiny, martenzitické litiny, ledeburitické litiny, atd.), dle význačné vlastnosti či použití materiálu (litiny korozivzdorné, otěruvzdorné, žárovzdorné, žárovevné, se zvláštními fyzikálními vlastnostmi, atd.). Z celého tohoto širokého spektra materiálů se práce věnuje austenitickým niklovým litinám s kuličkovým grafitem (ANL), často označovaným též obchodním názvem jako Ni-resisty. ANL patří svými vlastnostmi mezi velmi zajímavé a perspektivní materiály. Literatury zabývající se obecně jejich vlastnostmi a použitím je poměrně dost, avšak publikací, které se věnují výrobě a praktickým problémům při odlévání těžkých odlitků z těchto materiálů je jen málo.

## 2 CÍLE PRÁCE

Tato dizertační práce se zaměřuje na rozšíření a upřesnění informací zejména z oblasti tuhnutí těžších odlitků z ANL. Navazuje na projekt FT-TA3/007 „Výzkum a optimalizace výroby vysokolegovaných litin pro odlitky“ a zaměřuje se především na jeho část, která se týká stanovení teploty likvidu a eutektické teploty a stanovení eutektické koncentrace uhlíku pro konkrétní chemické složení materiálu. Znalost těchto teplot, zejména pak teploty likvidu, je velmi důležitá pro stanovení optimální lící teploty. Znalost eutektické koncentrace uhlíku pro konkrétní chemické složení materiálu zase umožňuje optimalizovat chemické složení tavby tak, aby vždy odpovídala přibližně eutektickému složení, což zaručuje dosažení nejlepších slévárenských vlastností.

Data získaná z měření experimentálních odlitků jsou použita pro vytvoření počítačového programu, který umožňuje i v provozních podmínkách jednoduchým zadáním chemického složení tavby rychle a přesně spočítat eutektickou teplotu, teplotu likvidu a na základě ní i odpichovou a lící teplotu. Tento program pak také na základě termodynamických rovnic vypočte pro zadané chemické složení tavby přesnou eutektickou koncentraci uhlíku.

Dále je v práci také zkoumána možnost a účelnost použití filtrace při odlévání odlitků z ANL. Krátce je také věnována pozornost rozboru některých základních metalurgických problémů typických pro ANL, jako jsou např. problematika vzniku degradované formy grafitu, tzv. chunky grafitu, či stabilita austenitické matrice při pokojové teplotě.

Cílem celého projektu FT-TA3/007 „Výzkum a optimalizace výroby vysokolegovaných litin pro odlitky“ bylo vypracovat a následně i provozně ověřit kompletní technologii výroby odlitků o hmotnosti přibližně 1 až 40 tun z vysokolegovaných niklových litin. Součástí projektu bylo mimo řešení slévárenských a metalurgických problémů i ověření možností a podmínek zkoušení a detekce vad, dále opravného svařování, tepelného zpracování a obrábění odlitků z těchto specifických materiálů. Jak je vidět, rozsah tohoto projektu je velmi široký, a proto se tato práce věnuje a dále rozvíjí především jeho výše zmíněnou část.

Předložená práce má tedy tomuto cíli přispět řešením problematiky technologie ve fázi výroby tekutého kovu a odlévání. Cílem je ověřit a doplnit poznatky o výrobě těžkých odlitků z ANL v oblasti řízení odpichové a lící teploty, řízení obsahu uhlíku s ohledem na predikci eutektického složení a v oblasti nastavení vhodného chemického složení litiny s ohledem na vznik chunky grafitu a stabilitu austenitické matrice a dále možnosti filtrace litiny během odlévání odlitků. Pro praktické využití zjištěných výsledků pak navrhnout a vypracovat vhodný výpočetní program umožňující použití ve výrobní praxi.

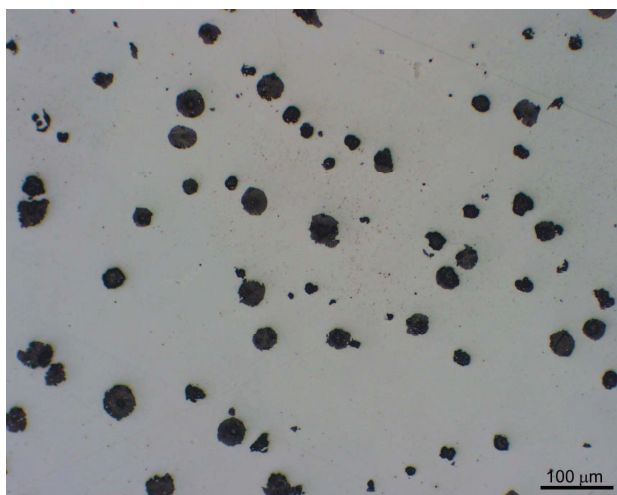
### 3 TEORETICKÁ ČÁST

Austenitické niklové litiny jsou normovány prakticky ve všech vyspělých státech světa. V Německu dle DIN 1694, v Británii dle BS 3468, ve Francii dle NF A32-301, v Austrálii dle AS-1833, v Japonsku dle JIS G 5510 a také dle mezinárodní normy ISO 2892. V současné době je v platnosti evropská norma EN 13835. Avšak nejstarší normou zabývající se austenitickými niklovými litinami je americká ASTM A 439. Slévárna metalurgického závodu ŽŽAS a.s. preferuje s ohledem na zákazníky normu ASTM, proto i v této práci je nejčastěji užíváno značení dle této normy, avšak v některých případech je v textu ojediněle citováno značení podle evropských norem.

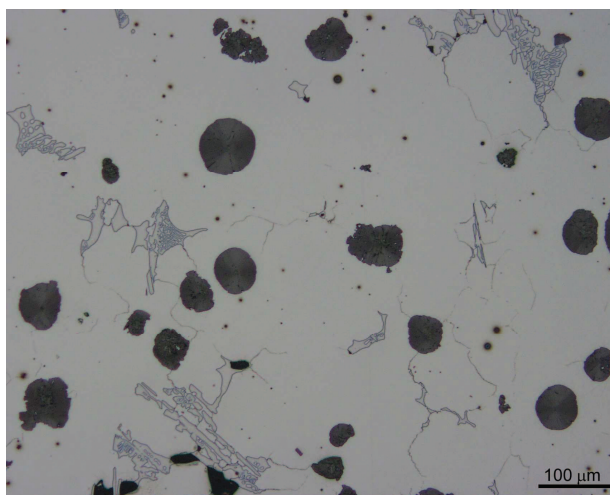
#### 3.1 AUSTENITICKÉ NIKLOVÉ LITINY

Nikl byl objeven v roce 1751. První pokusy o zlepšení vlastností litin pomocí legování niklem byly prováděny na konci 18. století. Na začátku 19. století byly provedeny detailnější studie zabývající se vlastnostmi litin legovaných niklem, nicméně studiu struktury ani její klasifikaci nebyla věnována pozornost. Základní výzkum austenitických niklových litin (dále ANL) byl prováděn v letech 1925 až 1930 v USA a v Anglii. Bylo zjištěno, že litiny s vysokým obsahem niklu mají i při pokojové teplotě austenitickou matici. Dále byl zkoumán vliv křemíku na strukturu a také možnost náhrady části niklu mědí [1]. Vlastní výrobu austenitické niklové litiny zavedla americká společnost International Nickel právě v letech 1925 až 1930, a to pod obchodním názvem Ni-Resist [2].

ANL tedy patří mezi vysokolegované litiny, kde hlavním legujícím prvkem je nikl. Struktura je tvořena homogenní austenitickou maticí, v níž je uložen grafit vyloučený ve formě kuliček (*obr. 1*). U značek s obsahem chromu jsou navíc ve struktuře obsaženy karbidy (*obr. 2*). V sortimentu austenitických niklových litin jsou i značky s grafitem vyloučeným ve formě lupínků, tyto značky jsou legovány vedle niklu i mědí.



**Obr. 1** – Struktura ANL bez karbidotvorných prvků



**Obr. 2** - Struktura ANL s obsahem 1,7 % Cr

##### 3.1.1 Chemické složení ANL

Austenitické niklové litiny jsou legovány, jak už název napovídá, především niklem a dále je vždy obsažen uhlík a křemík. Vedle těchto hlavních legur bývají v jednotlivých vyráběných značkách ANL obsaženy i jiné legující prvky. Níže jsou uvedeny ty nejdůležitější z nich spolu s krátkým popisem jejich vlivu na mechanické, fyzikální či jiné vlastnosti ANL.

**Nikl** - jako hlavní legující prvek je obsažen vždy. Jeho obsah se pohybuje v rozmezí cca 12 až 37 % (dle ASTM A 439 viz. *tab. 1*). Nikl zvyšuje pevnost a tažnost, zatímco mez kluzu a tvrdost ovlivňuje jen málo. Změnou koncentrace niklu lze měnit tepelnou roztažnost litiny. Část niklu může být nahrazena jinými austenitotvornými prvky jako je měď či mangan [3] (viz. dále).

**Tab. 1** – Chemické složení ANL s kuličkovým grafitem dle ASTM A 439 [4]

Označení	Ni	Cr	Si	Cu	Mn	C max.	jiné
Ni-Resist D-2	18,0-22,0	1,75-2,75	1,0-3,0	0,5 max.	0,70-1,25	3,0	-
Ni-Resist D-2W	18,0-22,0	1,50-2,20	1,5-2,2	0,5 max.	0,5-1,5	3,0	0,12-0,20 Nb
Ni-Resist D-2B	18,0-22,0	2,75-4,00	1,5-3,0	0,5 max.	0,70-1,25	3,0	-
Nicrosilal Spheronic	18,0-22,0	1,0-2,5	4,5-5,5	0,5 max.	0,5-1,5	3,0	-
Ni-Resist D-2C	21,0-24,0	0,5 max.	1,0-3,0	0,5 max.	1,8-2,4	2,9	-
Ni-Resist D-2M	22,0-24,0	0,2 max.	1,5-2,5	0,5 max.	3,75-4,50	2,6	-
Ni-Resist D-3A	28,0-32,0	1,0-1,5	1,0-2,8	0,5 max.	1,0 max.	2,6	-
Ni-Resist D-3	28,0-32,0	2,5-3,5	1,0-2,8	0,5 max.	1,0 max.	2,6	-
Ni-Resist D-4A	29,0-32,0	1,5-2,5	4,0-6,0	0,5 max.	0,5-1,5	2,6	-
Ni-Resist D-4	28,0-32,0	4,5-5,5	5,0-6,0	0,5 max.	1,0 max.	2,6	-
Ni-Resist D-5	34,0-36,0	0,1 max.	1,0-2,8	0,5 max.	1,0 max.	2,4	-
Ni-Resist D-5B	34,0-36,0	2,0-3,0	1,0-2,8	0,5 max.	1,0 max.	2,4	-
Ni-Resist D-5S	34,0-37,0	1,15-2,25	4,9-5,5	0,5 max.	1,0 max.	2,3	-
Ni-Resist D-6	12,0-14,0	0,2 max.	2,0-3,0	0,5 max.	6,0-7,0	3,0	-

Jak již bylo uvedeno, ve struktuře ANL je požadována homogenní austenitická matrice. Pouze u některých značek je přípustný obsah karbidů. Chceme-li austenitickou matici zajistit a zamezit tím případné korozi pod napětím, pak by složení litiny mělo odpovídat následujícímu vzorci pro výpočet niklového ekvivalentu [3,5,6]:

$$Ni_{ekv.} = \%Ni + \%Cr + 2 \cdot \%Mn > 23,5 \quad (1)$$

Platnost tohoto kritéria potvrzují jak uvedené literární zdroje, tak i praktické zkušenosti ze slévárny Žďas a.s. či z lití experimentálních taveb ve školní slévárně na VUT v Brně. Při jeho splnění bylo vždy dosaženo homogenní austenitické struktury.

V případě, že rovnice (1) není splněna, hrozí nestabilita austenitu a jeho transformace na martenzit při nízkých teplotách, příp. i při pokojové teplotě a zejména pak při spolupůsobení mechanického namáhání [6]. Dle literatury [7] je vliv niklu na teplotu martenzit start (dále  $M_s$ ) relativně malý, zvýšení obsahu niklu o 1 % (v rozsahu koncentrace niklu 10 – 20 %) způsobí pokles teploty  $M_s$  o 10°C. Pro zaručení austenitické struktury v litém stavu by litina neměla obsahovat méně než 17 % Ni. Obsah niklu lze snížit až na 14,5 %, ale pro dosažení homogenní a stabilní austenitické struktury je pak nutno použít žíhání na teplotu 1050°C po dobu 4 hodin [7].

Hodnota teploty  $M_s$  závisí především na chemickém složení litiny. Vliv některých vybraných prvků na teplotu  $M_s$  je uveden v *tab. 2*. Tato tabulka uvádí o kolik °C se změní (poklesne) teplota  $M_s$ , pokud se koncentrace daného prvku zvýší o 0,1 %.



**Tab. 2** - Vliv zvýšení koncentrace vybraných prvků o 0,1 % na teplotu  $M_S$  [1]

prvek	Mn	Cr	Ni	Si	Mo	C
vliv na $M_S$ [°C]	-3,3	-2,2	-1,7	-1,1	-1,1	-30

Údaj uvedený v této tabulce pro nikl, tedy že 0,1 % Ni sníží teplotu  $M_S$  o 1,7°C, resp. 1 % Ni sníží  $M_S$  o 17°C, je poněkud v rozporu s výše uvedeným údajem, že 1 % Ni (v rozsahu koncentrace niklu 10 – 20 %) způsobí pokles teploty  $M_S$  o 10°C. Přitom oba tyto údaje pochází ze stejného zdroje. Z tohoto důvodu je tedy nutno tato data brát spíše jen jako informativní. Dle literatury [7] lze teplotu  $M_S$  určit podle vzorce:

$$M_S = 500 - 300 \cdot \%C - 33 \cdot \%Mn - 17 \cdot \%Ni - 11 \cdot \%Si - 22 \cdot \%Cr - 11 \cdot \%Mo - 8 \cdot \%Cu \quad (2)$$

Tento vzorec platí pro ANL s obsahem niklu 13 a 20 % po žíhání na 700 a 1000°C. Více se problematikou stability austenitické struktury v litém stavu, ale zejména pak ve stavu po expozici zvýšeným teplotám zabývá literatura [1,7-10].

**Uhlík** - snižuje teplotu likvidu, zlepšuje tekutost a způsobuje grafitizační expanzi čímž zlepšuje dosazování litiny. Obsah uhlíku má nejsilnější vliv na licí vlastnosti a vylučování grafitu na hustotu (těsnost) odlitků. Ukázalo se, že je dobré nastavit nejvyšší možný obsah uhlíku, který je dovolen dle normy, aby se vyloučilo maximum grafitu [11]. Vyšší obsah uhlíku na jedné straně zlepšuje dosazování litiny, na druhé straně se lepších pevností a tažností dosahuje při nižším obsahu uhlíku. Uhlík však současně s křemíkem zvyšuje náchylnost litiny k vylučování chunky grafitu [3].

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu nelze použít jednoduchý vzorec (3) užívaný pro běžné druhy grafitických litin.

$$C_e = \%C + \frac{1}{3}(\%Si + \%P) \quad (3)$$

Výpočet uhlíkového ekvivalentu u ANL je komplikován vysokým obsahem legujících prvků, zejména niklu. Nikl totiž zvyšuje aktivitu uhlíku ( $\epsilon = +2,9$  [12]), a proto snižuje jeho rozpustnost v litině, takže se eutektická koncentrace uhlíku posunuje k nižším hodnotám koncentrace uhlíku. V literatuře jsou uváděny empirické rovnice, které uvažují vliv křemíku a niklu. Pro stanovení uhlíkového ekvivalentu v austenitických niklových litinách se doporučuje používat rovnici [1,2,3,6,7,13,14]:

$$C_e = \%C + 0,33 \cdot \%Si + 0,047 \cdot \%Ni - 0,0055 \cdot \%Ni \cdot \%Si \quad (4)$$

Obsah uhlíku je navíc omezen eutektickou koncentrací. U těžkých odlitků, zejména s masivní tloušťkou stěn, hrozí při překročení jeho eutektické koncentrace nebezpečí flotace grafitu.

**Křemík** - snižuje tvorbu karbidů a do ANL se přidává podle tloušťky stěny. V tlustostěnných odlitcích jsou k dispozici jen velmi malé tolerance pro změny uhlíku, niklu a křemíku, které vyhovují podmínkám za jakých nevzniká Chunky grafit [5]. Křemík je podobně jako u ostatních litin důležitý při očkování litiny. K očkování se používají slitiny na bázi FeSi, ale bez obsahu KVZ, zejména céru a bez vápníku.

Z dalších legujících prvků může být v ANL obsažen:

**Chrom** - jeho rozpustnost v austenitické matici je asi 0,5 %, nad touto koncentrací se začnou vylučovat feromagnetické karbidy typu  $(\text{FeCr})_3\text{C}$  a  $(\text{FeCr})_7\text{C}_3$ , které zvyšují korozivzdornost, pevnost, ořezavzdornost a zlepšují vlastnosti za vysokých teplot [2]. Pokud jsou však karbidy vyloučeny ve formě souvislého síťoví, dochází potom k výraznému poklesu mechanických vlastností materiálu. Přítomnost většího množství karbidů také značně zhoršuje obrobiteľnosť.

**Mangan** - nedělá při výrobě ANL normálně žádné problémy, pokud se jeho obsah drží pod asi 2 %. Při výrobě nemagnetických, zvláštních druhů z austenitické litiny jako GGL-NiMn 13 7 (Nomag) a GGG-NiMn 13 7 (Nodumag), jejichž obsah manganu se pohybuje kolem 6,5 %, může vysoký obsah manganu působit ve slévárnách vážné technické potíže. Mangan ve vyšších koncentracích tvoří karbidy, které se vyskytují obzvláště v litém stavu. Protože tyto karbidy jsou nemagnetické, nemají nepříznivý vliv na požadovanou nižší magnetickou propustnost, ale zhoršují obrobiteľnosť odlitků [3]. Mangan nepřispívá ke zvýšení korozivzdornosti a jeho použití připadá v úvahu jen u odlitků, u kterých se požaduje nemagnetičnosť, ale nevyžaduje se korozivzdornost [5]. Přísada manganu stabilizuje austenitickou strukturu. Cena manganu je v posledních desetiletích přibližně o řád nižší než cena niklu, takže náhrada části niklu manganem má u některých značek ANL i nezanedbatelný ekonomický přínos.

**Měď** – stejně jako mangan lze také použít jako náhradu za část drahého niklu. Měď vykazuje omezenou rozpustnost v  $\gamma$ -železe v soustavách Fe-Ni-Cu a Fe-C-Cu, a to 3 % při 835°C [1]. Uhlík její rozpustnost snižuje, zatímco nikl a mangan ji zvyšují. Měď má omezenou rozpustnost nejen v austenitu, ale dokonce i v tavenině [1]. V litinách s kuličkovým grafitem však měď ruší tvorbu kuličkového grafitu a prakticky se v těchto materiálech nepoužívá, její použití je pouze u austenitických litin s lupínkovým grafitem [5]. Pro názornost je v tab. 3 uvedeno chemické složení ANL s lupínkovým grafitem, kde je vidět, že některé značky mohou obsahovat až 7,5 % mědi.

**Tab. 3** – Chemické složení ANL s lupínkovým grafitem dle ASTM A 439 [4]

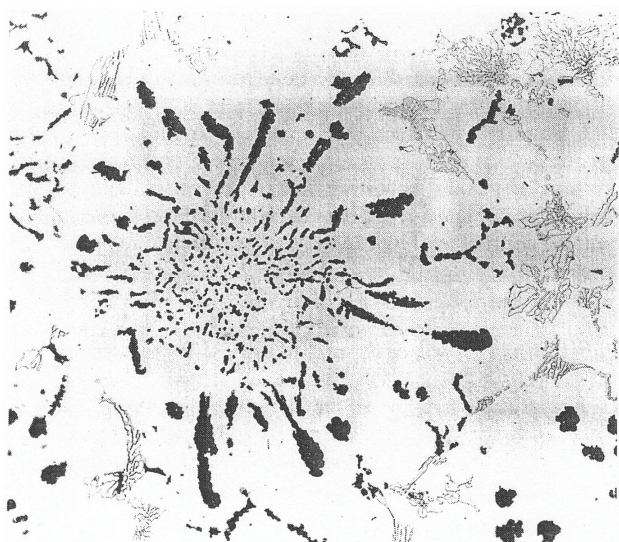
Označení	Ni	Cr	Si	Cu	Mn	C max.	jiné
NiMn 13 7	12,0-14,0	0,2 max.	1,5-3,0	-	6,0-7,0	3,0	-
Ni-Resist 1	13,5-17,5	1,5-2,5	1,0-2,8	5,5-7,5	0,5-1,5	3,0	-
Ni-Resist 1b	13,5-17,5	2,5-3,5	1,0-2,8	5,5-7,5	0,5-1,5	3,0	-
Ni-Resist 2	18,0-22,0	1,5-2,5	1,0-2,8	0,5 max.	0,5-1,5	3,0	-
Ni-Resist 2b	18,0-22,0	3,0-6,0	1,0-2,8	0,5 max.	0,5-1,5	3,0	-
Nicrosilal	18,0-22,0	1,5-4,5	3,5-5,5	-	0,5-1,5	2,5	-
Ni-Resist 3	28,0-32,0	2,5-3,5	1,0-2,0	0,5 max.	0,5-1,5	2,6	-
Ni-Resist 4	29,0-32,0	4,5-5,5	5,0-6,0	0,5 max.	0,5-1,5	2,6	-
Ni-Resist 5	34,0-36,0	0,1 max.	1,0-2,0	0,5 max.	0,5-1,5	2,4	-
Ni-Resist 6	18,0-22,0	1,0-2,0	1,5-2,5	3,5-5,5	0,5-1,5	3,0	1,0 Mo

**Niob** – může být přidáván pro zlepšení svařitelnosti ANL. Legování niobem zamezuje tvorbě mikrotrhlin ve svaru. Svařitelnost při legování niobem je dále ovlivněna obsahem fosforu, hořčíku a křemíku. Optimální množství přidávaného niobu doporučuje literatura počítat dle vzorce [5,7,15]:

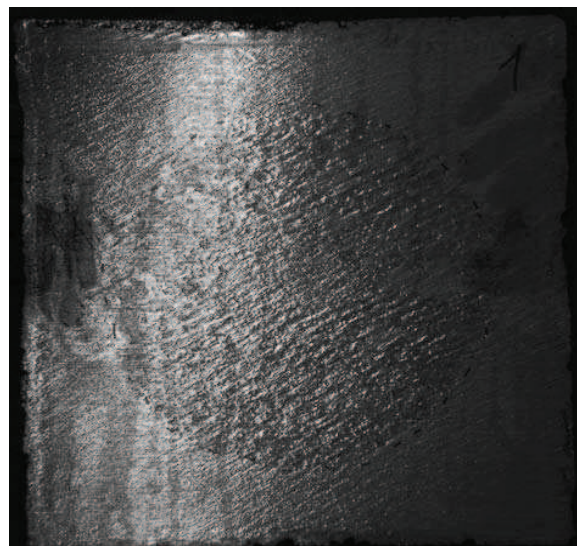
$$\%Nb \geq 0,0286 \cdot (\%Si + 64 \cdot \%Mg - 5,6) + 8 \cdot (\%P - 0,025) \quad (5)$$

### ***Problematika vzniku chunky grafitu***

Vhodné chemické složení se navíc musí volit s přihlédnutím k nebezpečí tvorby chunky grafitu. Chunky grafit je nežádoucí degradovaná forma grafitu (viz. *obr. 3*). Vzniká především v místech s dlouhou dobou tuhnutí, tedy v tepelných uzlech a v silnostěnných masivních odlitcích. Jeho přítomnost je dobře viditelná na opracované ploše po odstranění nálitků, kde se projevuje jako matná zóna na jinak čistém povrchu (viz. *obr. 4*).

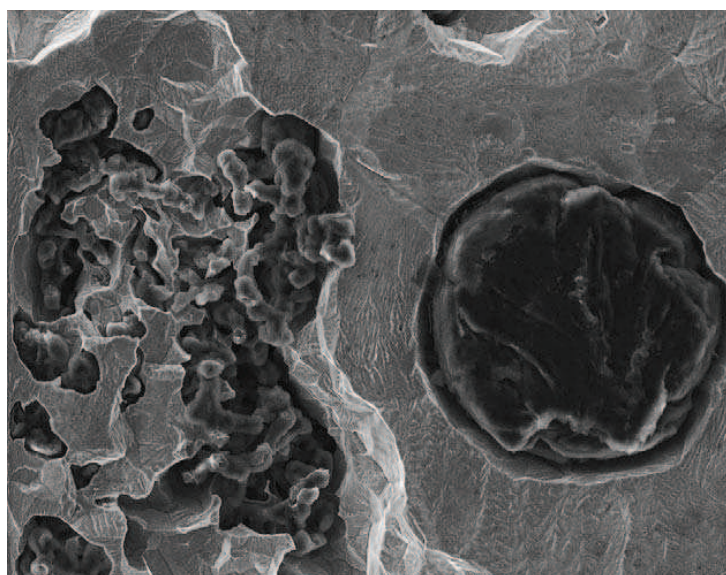


***Obr. 3*** – Chunky grafit ve struktuře ANL [15]



***Obr. 4*** – Chunky grafit na řezné ploše krychle o hraně 30 cm [16]

Chunky grafit nebývá problémem jen u ANL, ale vyskytuje se i u masivnějších odlitků z litiny s kuličkovým grafitem (dále LKG), kde bývá často pozorován ve středových partiích a velkých tepelných uzlech. Má složitou, rozvětvenou morfolologii, která je dobře patrná na *obr. 5*, pořízeném pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu na hluboce leptaném vzorku LKG. Na tomto obrázku je navíc možno dobře porovnat velikost a morfolologii chunky grafitu s běžným kulovitým zrnem grafitu.

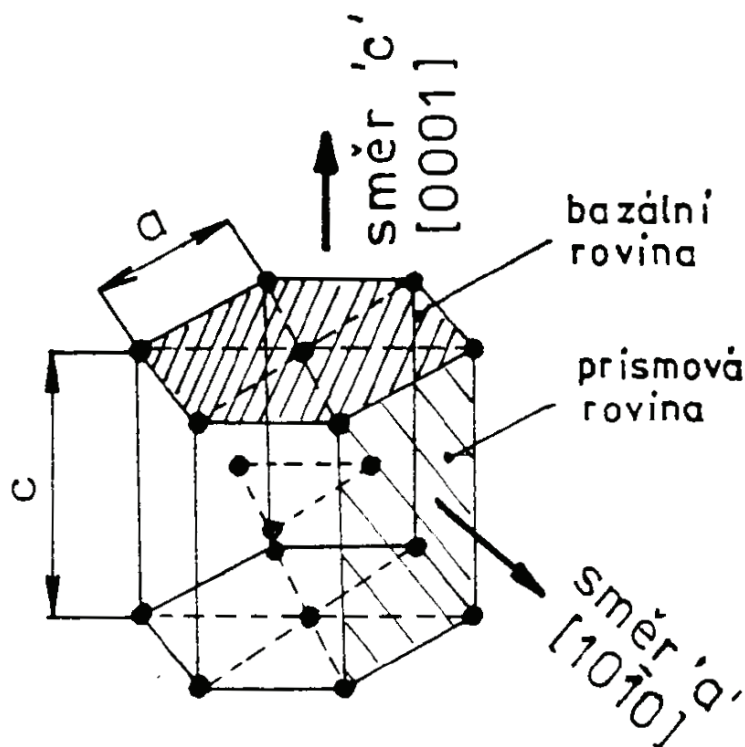


***Obr. 5*** – Morfologie chunky grafitu v porovnání s klasickým kulovitým zrnem grafitu [17]



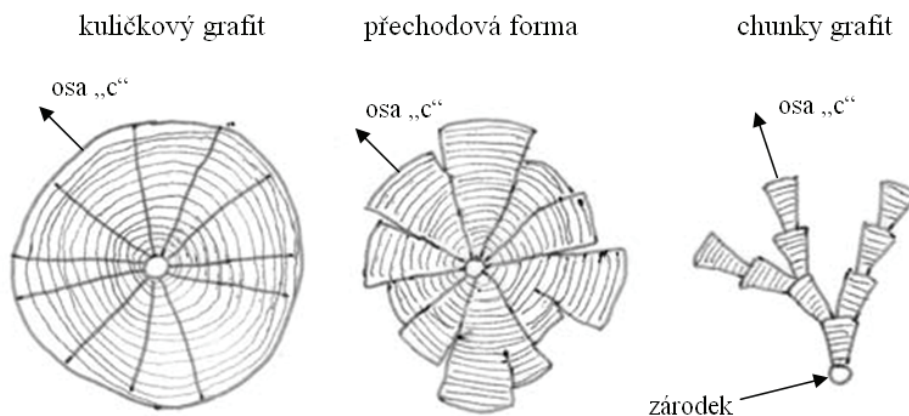
Eutektické buňky chunky grafitu vykazují přibližně kulový tvar, ale jsou podstatně větší než eutektické buňky kuličkového grafitu vyskytující se ve stejné části odlitku [18]. V místech posledního tuhnutí mezi oblastmi chunky grafitu bývají přítomny oblasti kuličkového grafitu, což nasvědčuje tomu, že chunky grafit vzniká dříve, a to během eutektického tuhnutí [17].

Bylo prozkoumáno mnoho různých forem chunky grafitu (jemnější i hrubší) a bylo prokázáno, že všechny mají stejnou paprscitou strukturu jako částice kuličkového grafitu s dominantním růstem ve směru osy „c“ hexagonální mřížky grafitu [18] (směry a roviny v hexagonální mřížce viz. obr. 6).



**Obr. 6** – Hexagonální mřížka grafitu [19]

Předpokládá se, že způsob nukleace chunky grafitu je stejný jako u grafitu kuličkového, ale při růstu se chunky grafit začne výrazně rozvětňovat [18]. Na základě toho pak autoři literatury [18 a 20] odvodili, že chunky grafit vzniká z kuličkového grafitu a je tedy jeho degradovanou formou. Schématický model degradace kuličkového grafitu na chunky grafit je znázorněn na obr. 7.



**Obr. 7** – Schématický model vzniku chunky grafitu [21]

Chunky grafit způsobuje výrazné zhoršení mechanických vlastností ANL, zejména pevnosti (až o 20% [2]) a tažnosti (až o 50% [2]), zatímco mez kluzu a tvrdost příliš ovlivněny nejsou [17]. Největší vliv na tvorbu chunky grafitu v ANL má doba tuhnutí a vzájemný poměr obsahu niklu, uhlíku a křemíku. Pro zabránění vzniku chunky grafitu, se doporučuje nastavit chemické složení tak, aby odpovídalo následujícímu vztahu [1,2,3,6,7,13,15]:

$$\%C + 0,2 \cdot \%Si + 0,06 \cdot \%Ni < 4,4 \quad (6)$$

Je-li na pravé straně výrazu číslo větší než 4,4 je vznik chunky grafitu velmi pravděpodobný. Tento vzorec platí pro odlitky s dobou tuhnutí do 40 minut, je-li však doba tuhnutí kratší než 40 minut, zvyšuje se přípustná hodnota z 4,4 na 4,5 a u slabostěnných odlitků až na 5,0 [2]. Vztah nezohledňuje vliv doprovodných prvků. Přítomnost céru a vápníku může vyvolat rovněž vznik chunky grafitu. K modifikaci je proto nutné používat slitiny s hořčíkem bez céru a k očkování očkovačla bez céru a vápníku.

### 3.1.2 Mechanické vlastnosti ANL

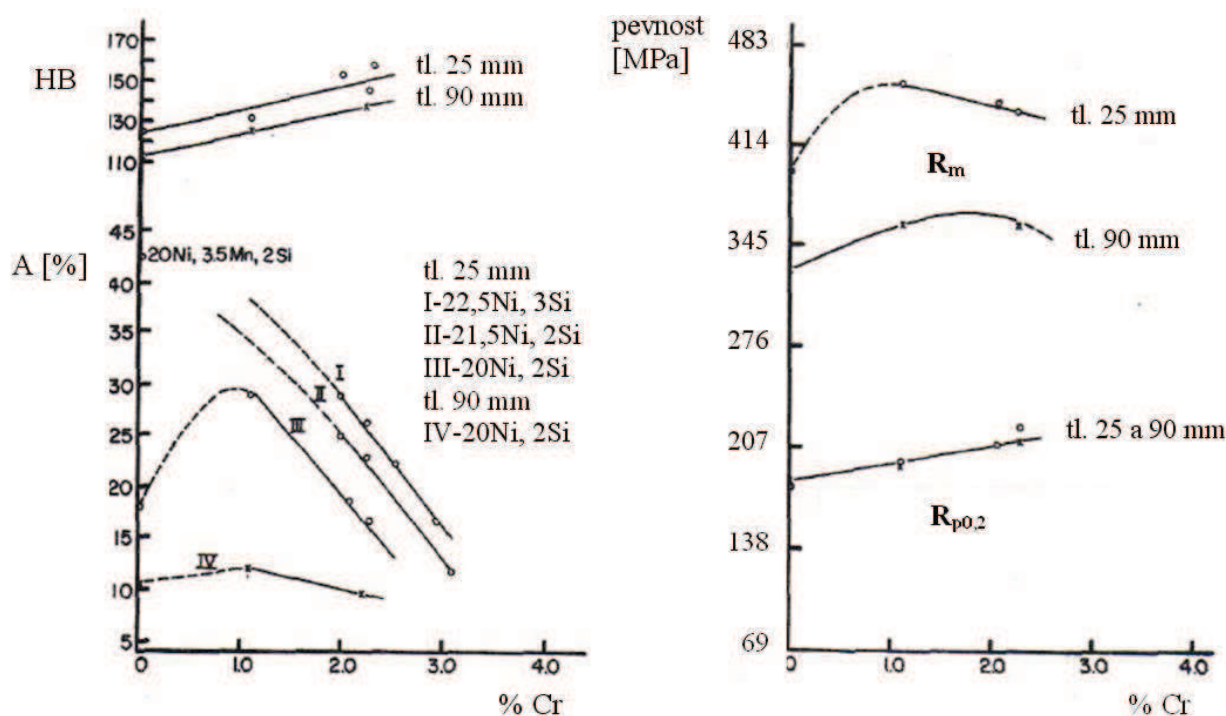
Mechanické vlastnosti jsou největší měrou ovlivněny austenitickou maticí. Pevnost v tahu je u ANL s kuličkovým grafitem podobná u všech značek. To je dáno právě austenitickou maticí, která je pro všechny druhy společná. Určitých změn pevnosti lze dosáhnout regulací velikosti a rozložení nodulí grafitu, příp. lze pevnost zvýšit snížením obsahu uhlíku a křemíku či zvýšením obsahu chromu [4]. Hodnoty nárazové práce jsou vyšší než u běžné LKG, ale co je zejména důležité, díky austenitické matici ANL nevykazují tranzitní chování ani při teplotách hluboko pod 0°C. Hodnoty mechanických vlastností ANL s kuličkovým grafitem dle ASTM A 439 jsou uvedeny v tab. 4.

**Tab. 4** – Hodnoty mechanických vlastností dle ASTM A 439 [4]

Označení	Rm [MPa]	Rp0.2 [MPa]	Tažnost [%]	Modul pružnosti [GPa]	Nárazová práce [J]	Tvrdost [HB]
Ni-Resist D-2	370-480	210-250	7-20	112-130	14-27	140-200
Ni-Resist D-2W	370-480	210-250	8-20	112-130	14-27	140-200
Ni-Resist D-2B	390-500	210-260	7-15	112-133	12	150-255
Nicrosilal Spheronic	370-440	210-260	10-18	-	-	180-230
Ni-Resist D-2C	370-450	170-250	20-40	85-112	21-33	130-170
Ni-Resist D-2M	440-480	210-240	25-45	120-140	24-34	150-180
Ni-Resist D-3A	370-450	210-270	13-18	112-130	16	130-190
Ni-Resist D-3	370-480	210-260	7-18	92-105	8	140-200
Ni-Resist D-4A	380-500	210-270	10-20	130-150	10-16	130-170
Ni-Resist D-4	390-500	240-310	1-4	91	-	170-250
Ni-Resist D-5	370-420	210-240	20-40	112-140	20	130-180
Ni-Resist D-5B	370-450	210-290	7-10	112-123	7	140-190
Ni-Resist D-5S	370-500	200-290	10-20	110-145	12-19	130-170
Ni-Resist D-6	390-470	210-260	15-18	140-150	-	120-150

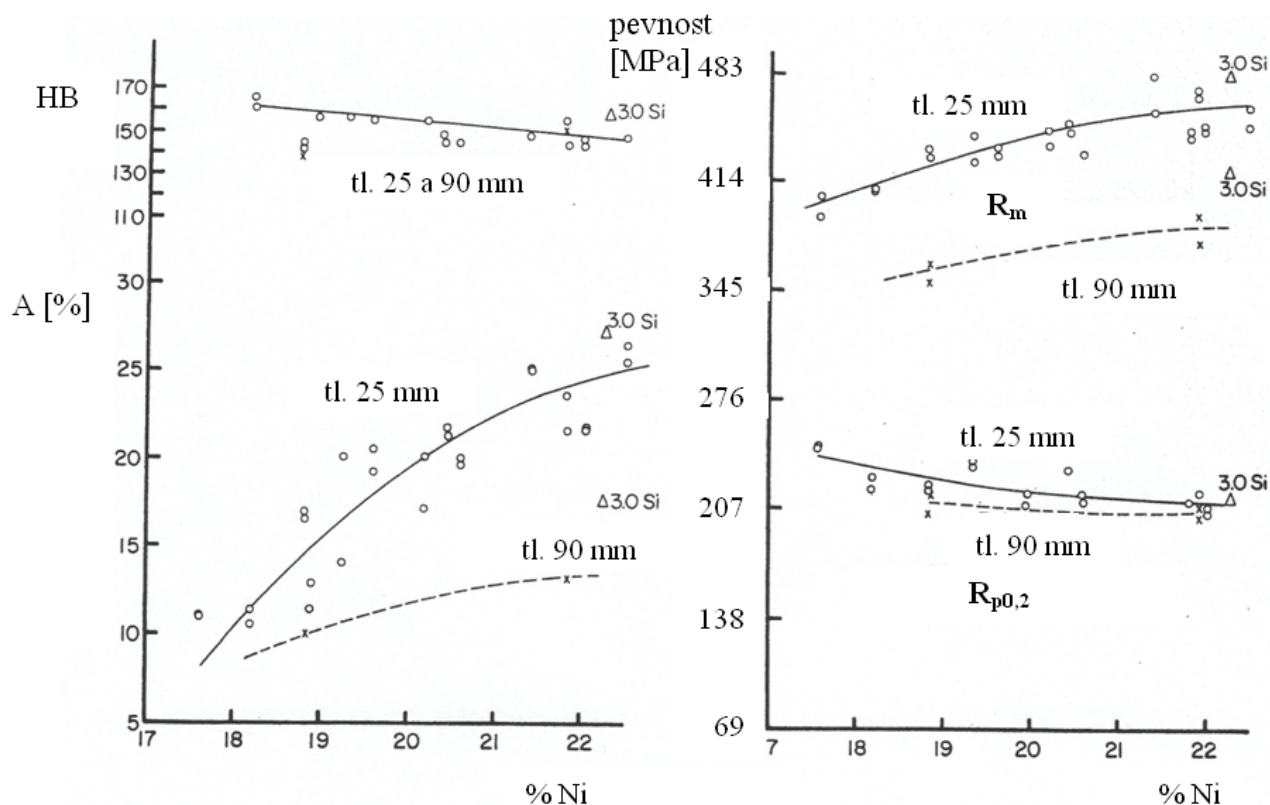
### Vliv chemického složení na mechanické vlastnosti

Z legujících prvků má největší vliv na mechanické vlastnosti ANL chrom, resp. karbidy chromu, které začnou ve struktuře vznikat. V grafu na obr. 8 je znázorněn vliv koncentrace chromu na pevnost, tažnost a tvrdost pro odlitky kýlových bloků s tloušťkou 25 a 90 mm. Jak je zde vidět, s rostoucím obsahem chromu plynule vzrůstá tvrdost a  $R_{p0,2}$ . Tažnost a pevnost jsou zpočátku přidavkem chromu výrazně zvyšovány, ale při obsahu kolem 1 % chromu se dosahuje maxima a s dalším zvyšováním jeho koncentrace dochází k vylučování stále většího množství karbidů ve struktuře, důsledkem čehož je pak pozvolný pokles těchto mechanických vlastností. Při velmi nízkých koncentracích chromu, kdy je ve struktuře jen nepatrné množství karbidů, by se daly očekávat nejvyšší hodnoty pevnosti a především tažnosti. Navzdory tomu, však materiál vykazuje poměrně nízké hodnoty těchto mechanických vlastností. Tento efekt je způsoben tím, že chrom má výrazný účinek na stabilitu austenitické matrice a při jeho zanedbatelných koncentracích (a není-li současně přítomen jiný prvek stabilizující austenit) se tato stává nestabilní. Vlivem plastické deformace při provádění tahové zkoušky pak část austenitu transformuje na martenzit, což má za následek zmíněné snížení pevnosti, ale zejména pak tažnosti [22].



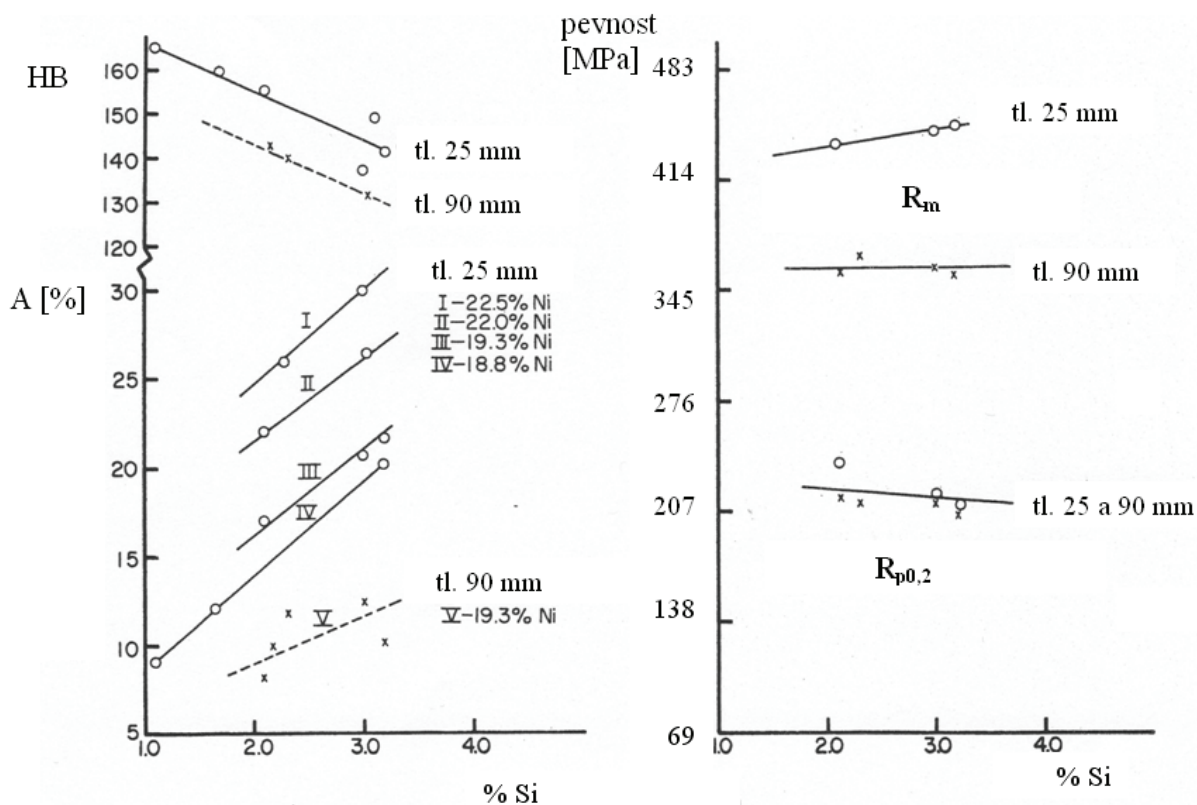
Obr. 8 – Vliv obsahu chromu v rozmezí 0 až 3 % na mechanické vlastnosti ANL [22]

Vliv chromu na mechanické vlastnosti ANL je sice velmi výrazný, nicméně vliv ostatních prvků, zejména niklu a křemíku, je třeba také brát v úvahu. Jedná se o grafitotvorné prvky a jejich vliv je opačný než je tomu u chromu. Na obr. 9 je znázorněn vliv koncentrace niklu na mechanické vlastnosti. Jak je vidět, nikl způsobuje velmi výrazné zvyšování tažnosti. Zatímco při obsahu niklu kolem 18 % dosahuje materiál tažnosti přibližně 10 %, tak při obsahu asi 22,5 % Ni je již tažnost na hodnotách okolo 25 %. Pevnost s obsahem niklu rovněž roste, ovšem již ne tak výrazně. Mez kluzu, stejně jako tvrdost, vykazují mírný pokles [22].



**Obr. 9** – Vliv niklu na mechanické vlastnosti ANL [22]

Jak je vidět z obr. 10, je vliv křemíku do jisté míry podobný jako je vliv niklu. S rostoucím obsahem křemíku značně roste tažnost, nárůst pevnosti je jen pozvolný. Mez kluzu a tvrdost jsou s rostoucí koncentrací snižovány. U tvrdosti je tento pokles poměrně výrazný.



**Obr. 10** – Vliv křemíku na mechanické vlastnosti ANL [22]



Podle literatury [7] lze mechanické vlastnosti ANL po vyžehání na 1000°C, konkrétně pevnost a tažnost, vypočítat na základě jejich konkrétního chemického složení, a to pomocí následujících vzorců:

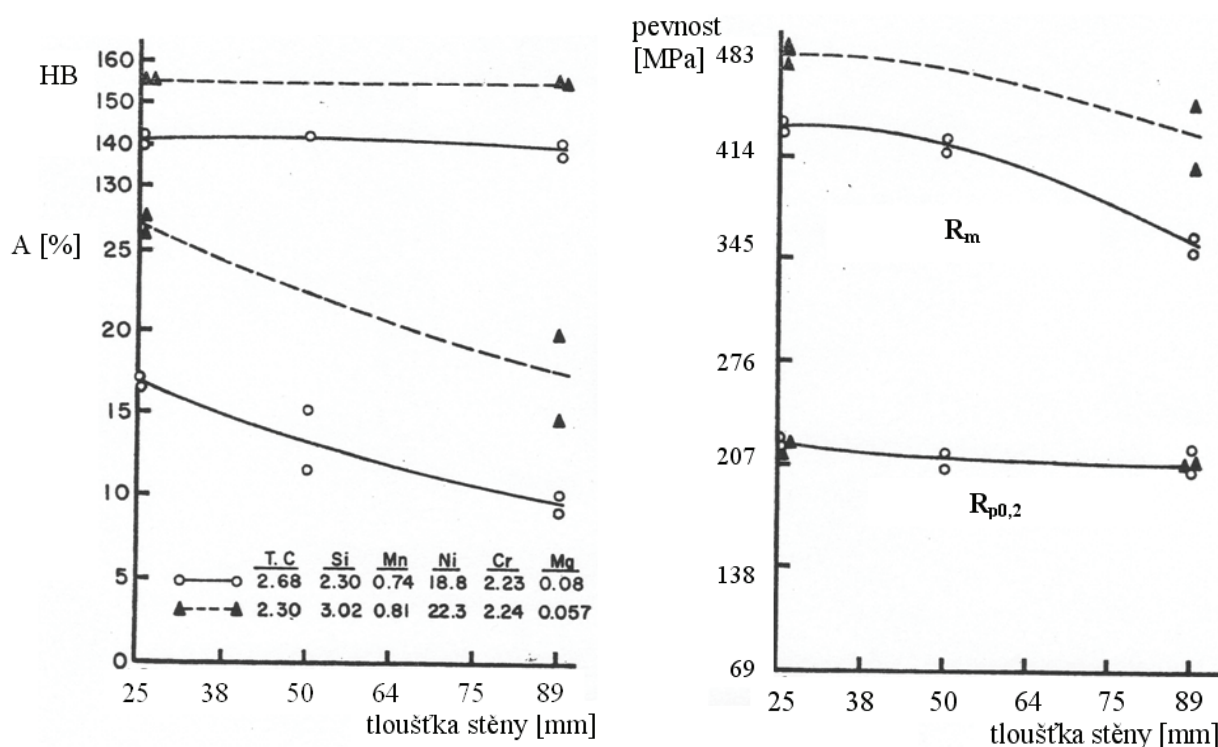
$$R_m [\text{MPa}] = 430 + 2 \cdot \%C + 4 \cdot \%Si - \%Mn - 10 \cdot \%Cr + 5 \cdot \%Ni - 5 \cdot \%Al \quad (7)$$

$$A [\%] = -4,9 + 1,7 \cdot \%C + 6,1 \cdot \%Si - 8,6 \cdot \%Cr - 8,6 \cdot \%Mn + 1,2 \cdot \%Ni - 0,5 \cdot \%Al \quad (8)$$

Z těchto vzorců vyplývá, že chrom významně snižuje pevnost resp. tažnost ANL. Jak je však patrné z *obr. 8*, toto platí až od koncentrace chromu přibližně 1 % a výše. Do této koncentrace je vliv chromu opačný a mechanické vlastnosti zvyšuje. V citované literatuře [7] nejsou uvedeny žádné meze platnosti těchto vzorců, nicméně podle výše uvedených skutečností týkajících se nestability austenitické matrice a vzniku martenzitu při plastické deformaci ANL s obsahem chromu pod 1 % (viz. *obr. 8*), by se dalo předpokládat, že tyto vzorce jsou platné pro ANL s koncentrací chromu 1 % a více.

### ***Vliv tloušťky stěny na mechanické vlastnosti***

Vliv tloušťky stěny odlitku na mechanické vlastnosti ANL je znázorněn na *obr. 11*. a je obdobný jako u jiných litin. Tedy s rostoucí tloušťkou stěny klesá pevnost a méně výrazně i tažnost. Mez kluzu a tvrdost nejsou tloušťkou stěny odlitku výrazněji ovlivňovány.



**Obr. 11-** Vliv tloušťky stěny na mechanické vlastnosti ANL [22]

Vliv jednotlivých legujících prvků je v odlitcích s rozdílnou tloušťkou stěny obdobný, nicméně u odlitků s masivnějšími stěnami je vliv legur méně výrazný než ve stěnách tenkých, jak je patrné z *obr. 8*, *obr. 9* a *obr. 10* [22].

Rozdílné tloušťky stěn odlitků způsobují také změny v mikrostruktuře ANL. S rostoucí tloušťkou stěny, a tím tedy prodlužující se dobou tuhnutí a chladnutí, dochází ke hrubnutí částic



karbidů a ke zvětšování nodulí kuličkového grafitu. Ty se navíc stávají více nepravidelné a dochází k mírné degradaci jejich kulovitého tvaru [22]. Vlivem tloušťky stěny na morfologii grafitu u ANL značky D5-S, u odlitků silných 3, 6 a 10 mm, se blíže zabývá literatura [23]. Navíc je zde zkoumán i vliv formovacího materiálu.

### 3.1.3 Základní vlastnosti a použití ANL

ANL mají mnoho význačných vlastností, jimiž mohou konkurovat nerezavějícím ocelím, žárovevným ocelím i slitinám na bázi niklu. Při porovnání některých slévárenských vlastností ANL s ocelí zjistíme, že oproti legovaným ocelím mají odlitky z ANL lepší povrch a s tím související nižší čistírenskou pracnost. Dále je u odlitků s různou tloušťkou stěn menší náchylnost ke vzniku trhlin v přechodech tloušťky stěn. ANL má menší objemové smrštění než oceli, ale větší než nízkolegované a nelegované litiny [24]. Příklad na smrštění se zmenšuje se zvyšujícím se obsahem niklu. U značek s nižším obsahem niklu (Ni-Resist 1, 1B, 2, 2b a různé typy D-2) činí přírůstek na smrštění 0,02 mm/mm. U středních úrovní niklu (materiály Ni-Resist 3, 4, D-3 a D-4) je přírůstek 0,015 mm/mm a u materiálů s nejvyšším obsahem niklu (Ni-Resist 5 a D-5) je přírůstek 0,01 mm/mm [4].

ANL jsou díky austenitické matici nemagnetické, nicméně magnetické vlastnosti jsou ovlivněny přítomností karbidů, neboť např. karbidy chromu jsou feromagnetické. Naproti tomu karbidy manganu jsou nemagnetické, a proto jsou pro nemagnetické aplikace často používány značky legované manganem a bez chromu. Za skutečně nemagnetické materiály jsou považovány materiály Ni-Resist NiMn 13 7 a D-6 [4]. Pro tuto vlastnost jsou odlitky z ANL používány v energetických aplikacích, vyžadujících nemagnetičnost nebo např. také pro výrobu etážových převodů u námořních minolovek. Ne vždy je však nemagnetičnost ANL výhodou, protože např. znemožňuje použití magnetické fluorescenční metody, jenž je jinak jednou z nejčastěji používaných metod pro detekci povrchových vad odlitků.

Změnou obsahu niklu lze měnit koeficient tepelné roztažnosti. Značky s obsahem asi 35 % niklu mají velmi malou tepelnou roztažnost a používají se pro výrobu měřidel a přípravků pro měření nebo např. forem pro výrobu skleněných výrobků [6].

Austenitická matrice dává ANL vysokou tažnost a houževnatost, a to i při velmi nízkých teplotách. Např. materiál D-2C může pracovat i při teplotách  $-80^{\circ}\text{C}$  a součásti z materiálu D-2M, který byl vyvinut pro velmi nízké teploty, dokonce až při  $-196^{\circ}\text{C}$  [6]. Těchto vlastností se využívá např. při výrobě součástí chladících zařízení a v kryogenní technice.

ANL mají velmi dobrou žárovzdornost i žárovevnost a odolávají okujení a narůstání až do teploty  $800^{\circ}\text{C}$  [2]. Žárovzdornost se zvyšuje přidáním 1% molybdenu a pak je materiál použitelný až do teplot  $760^{\circ}\text{C}$  [5]. Díky těmto vlastnostem jsou ANL velmi vhodné pro výrobu skříní plynových i parních turbin, turbokompresorů, částí spalovacích motorů apod. Představitelem právě takového materiálu vyvinutého pro výrobu odlitků pracujících za zvýšených teplot může být např. D5-S. Vlastnostmi a chováním při a po expozici vysokým teplotám a také použitím tohoto materiálu se podrobněji zabývá např. literatura [25].

ANL vynikají vysokou odolností proti korozi. Jednotlivé značky odolávají kyselinám i zásadám, mořské vodě, ropným látkám i chloridům kovů. Používají se proto např. v zařízeních pro odsolování mořské vody, v chemickém a petrochemickém průmyslu pro potrubí, armatury a čerpadla agresivních látek a dále např. i v potravinářském průmyslu pro výrobu dílů čerpadel a součástí zařízení pro pečení [4]. Velice obsáhlý soubor dat týkajících se korozní odolnosti ANL v různých korozních prostředích při různých teplotách je obsažen v literatuře [4]. Jsou zde údaje pocházející jak z laboratorních testů, tak i z provozního nasazení reálných součástí.

ANL také poměrně dobře odolávají tření a abrazi. To je způsobeno jednak houževnatou austenitickou maticí a jednak také obsahem tvrdých karbidů chromu, které obsahuje většina značek ANL. Nezanedbatelnou roli pak hraje také přítomnost částic grafitu. Grafit zde působí jako lubrikant. Odolnost proti otěru lze navíc dále zvyšovat chemicko-tepelným zpracováním povrchu. Povrch ANL lze nitridovat v plynné atmosféře či v solné lázni (tzv. tufftriding, někdy též proces Tenifer) nebo boridovat, tedy sytit povrch bórem. Konkrétně posledně zmíněné boridování ANL dává velmi dobré výsledky. Tak např. povrch součásti vyrobené z ANL značky D-2 vykazuje po boridování vyšší odolnost proti opotřebení než součást z nitridované feritické oceli [7,26].

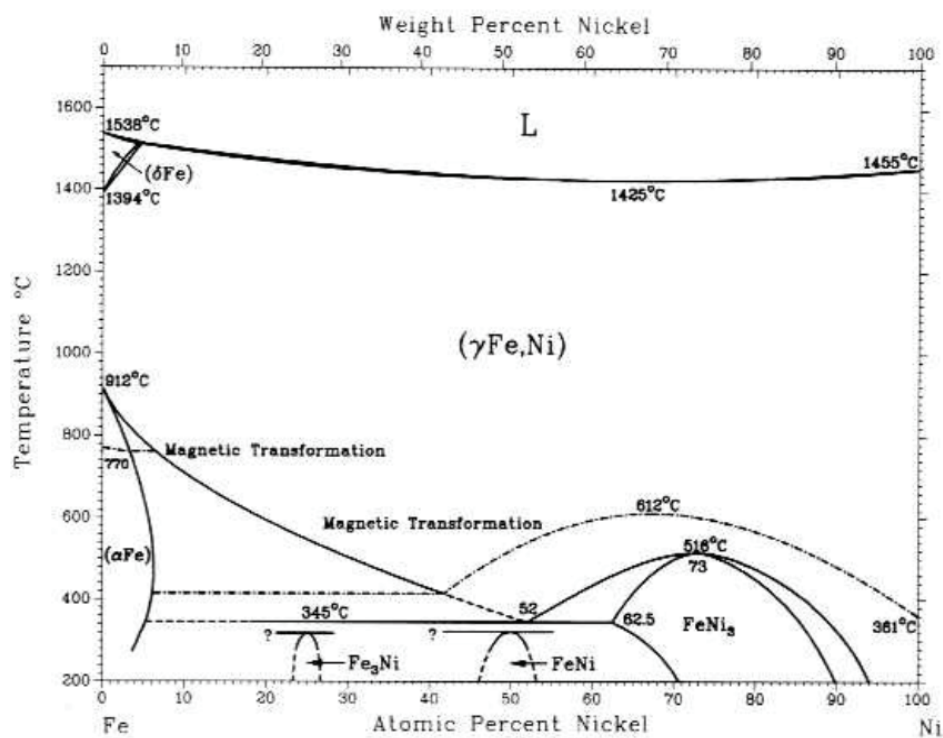
### 3.2 STANOVENÍ TEPLOTY LIKVIDU A EUTEKTICKÉ TEPLOTY

Znalost teploty likvidu u odlévané slitiny je velmi důležitá. Na základě znalosti této teploty je možné stanovit optimální lící teplotu a ta je u ANL obzvlášť důležitá. Vzhledem k tomu, že se jedná o nepolymorfní materiály, tedy takové, u nichž během chladnutí neprobíhají žádné fázové transformace, je odlévání bez zbytečného přehřívání taveniny prakticky jedinou možností pro zmenšení velikosti zrna.

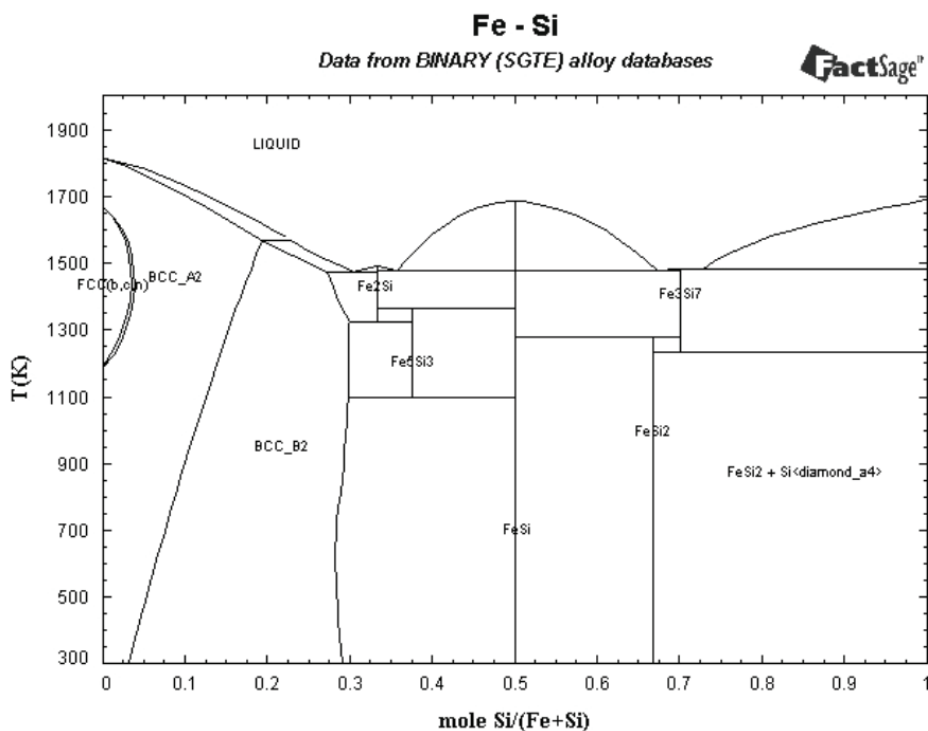
Se zvyšujícím se obsahem niklu teplota likvidu roste. Např. při stejně velkém přehřátí by Ni-Resist D-5 měl mít lící teplotu asi o 55°C vyšší než D-2. Pro Ni-Resist D-2 s 20 % Ni by měla být běžná lící teplota kolem 1425°C, zatímco pro značku D-5 s obsahem 35 % Ni by běžná lící teplota měla být až okolo 1480°C [11]. V práci [11] se poukazuje na vyšší jakost odlitků litých z nižší teploty. Odpichové teploty se zde udávají 1440 až 1480 °C. Těžké odlitky se silou stěny větší než 50 mm se mohou odlévat z teploty 1370 až 1400 °C [11].

Při stanovování optimální lící teploty se vychází z teploty likvidu dané slitiny, ztrát teploty kovu během odpichu a lití a nutného přehřátí taveniny pro odlití daného sortimentu odlitků. Teplotní ztráta kovu v pánvi je pro danou hmotnost tavby určena empiricky, stupeň přehřátí pak podle zkušeností nebo v současnosti též na základě simulace plnění a tuhnutí ve slévarenských simulačních programech. Stanovení eutektické teploty a teploty likvidu však musí vycházet ze známých rovnovážných diagramů, které musí uvažovat polykomponentní složení vysokolegovaných litin [27].

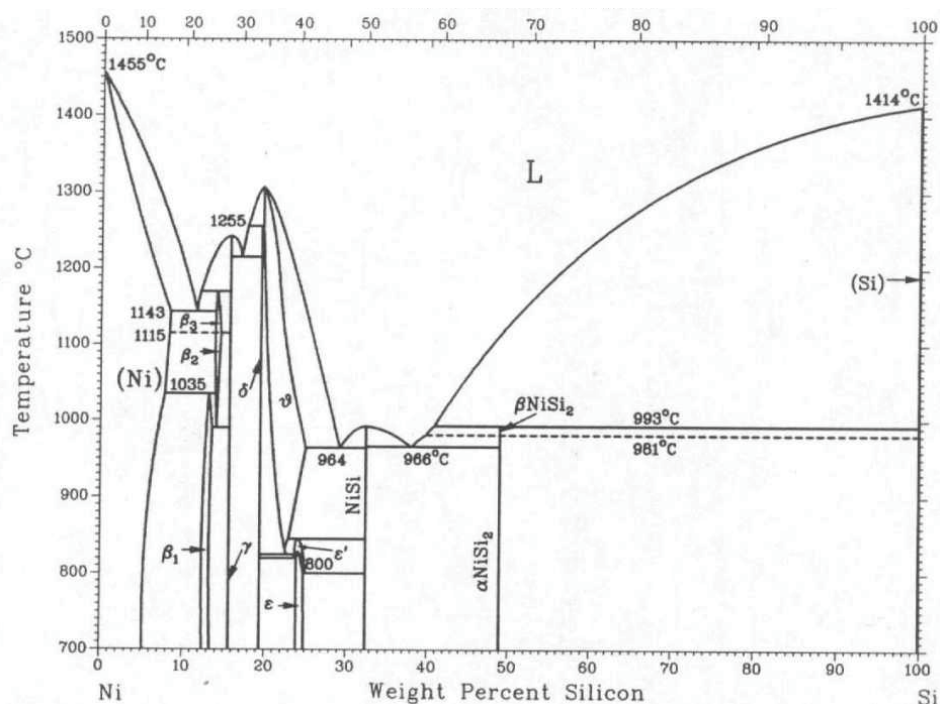
V literatuře lze nalézt binární diagramy Fe–C, Fe–Ni (*obr. 12*), Fe–Si (*obr. 13*), Ni–Si (*obr. 14*) apod. Nalezení ternárních rovnovážných diagramů Fe–C–Ni či Fe–Si–Ni je již podstatně složitější.



Obr. 12 – Binární rovnovážný diagram Fe-Ni [28]



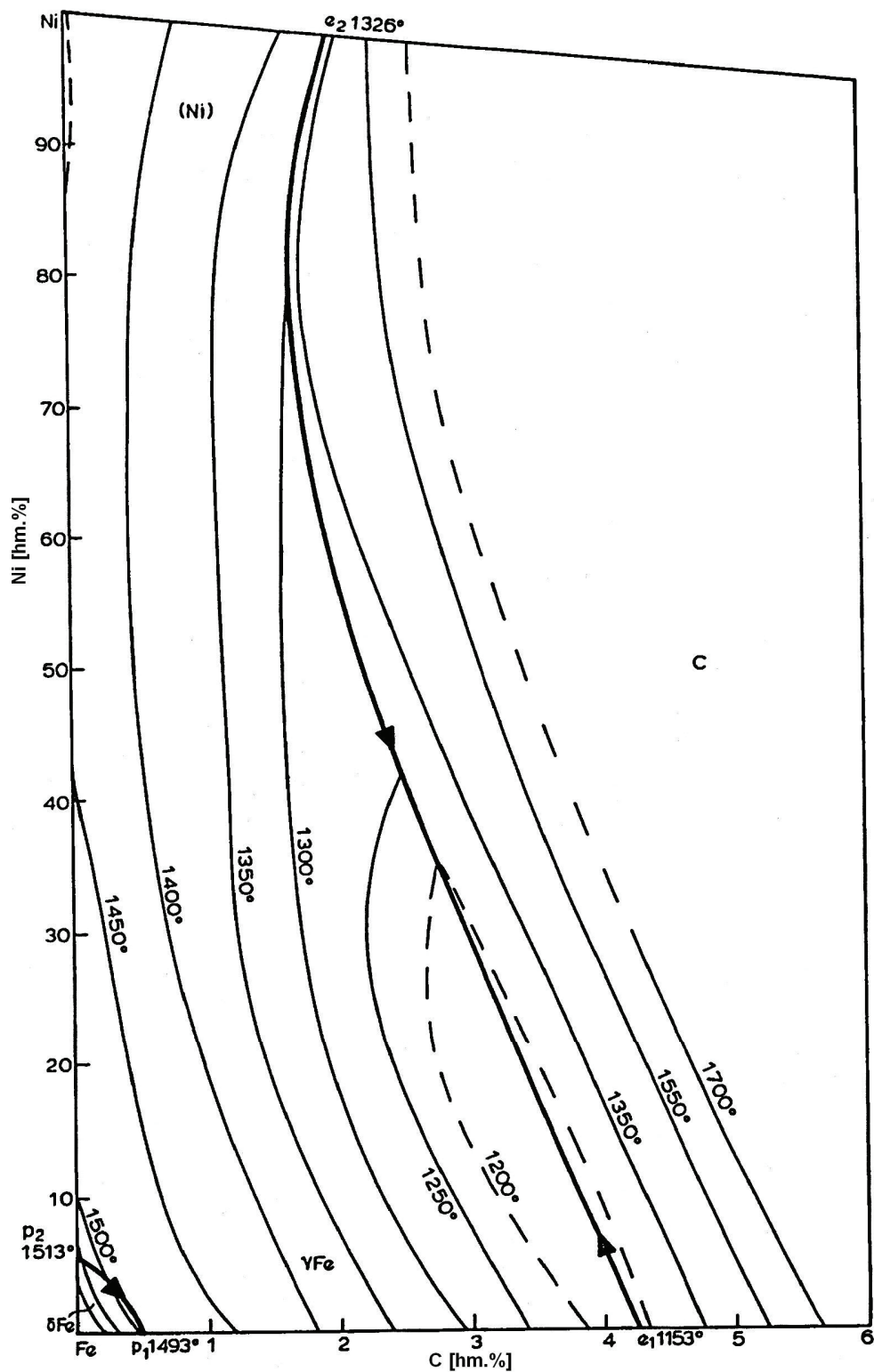
Obr. 13 – Binární rovnovážný diagram Fe-Si [29]



**Obr. 14** – Binární rovnovážný diagram Ni-Si [30]

Určité informace však nalézt lze, protože např. soustavě Fe–C–Ni byla v literatuře věnována určitá pozornost. Většina z těchto prací se však zabývá oceli, tudíž ne všechny informace jsou použitelné pro ANL. Rozdíl je především v obsahu uhlíku, kterého ANL obsahují řádově více.

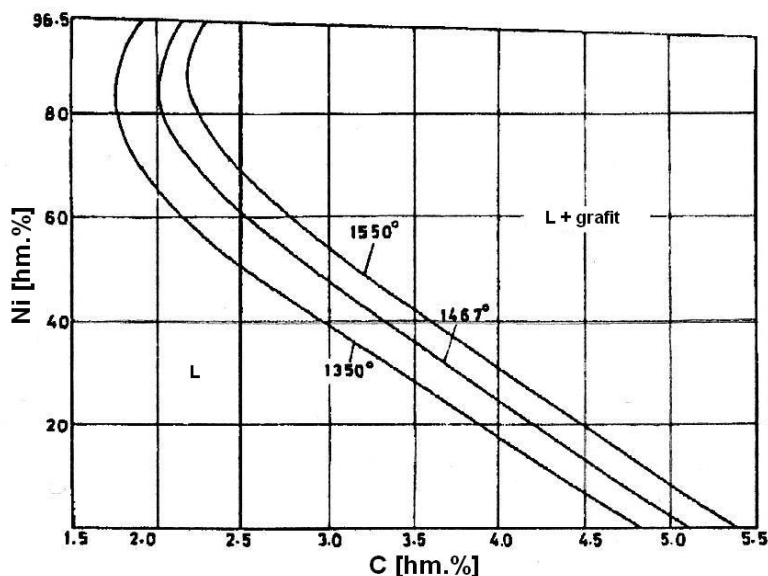
Některé zdroje se však věnují soustavě Fe–C–Ni obecněji a zde lze nalézt např. závislosti teplot likvidu na obsahu uhlíku a niklu, které se již nacházejí i v oblasti chemického složení, kde se pohybují i ANL (viz. obr. 15). Tedy v oblastech s obsahem niklu přibližně 18 až 35 % a uhlíku asi 2 až 3 %.



Obr. 15 – Projekce křivek likvidu v soustavě Fe-C-Ni [31]

Křivka vzniklá interpolací mezi body  $p_1$  (na ose Fe-C) a  $p_2$  (na ose Fe-Ni) vyznačuje oblast, kde probíhá peritektická reakce  $L + \delta\text{Fe} \leftrightarrow \gamma$ . Křivka mezi body  $e_1$  (na ose Fe-C) a  $e_2$  (nahore) pak představuje polohu eutektického bodu v soustavě Fe-C-Ni, tedy stav, kdy je při daném chemickém složení tuhý roztok s mřížkou fcc v rovnováze s taveninou a s grafitem. Dále nad touto křivkou pak leží isothermické křivky krystalizace primárního grafitu [31].

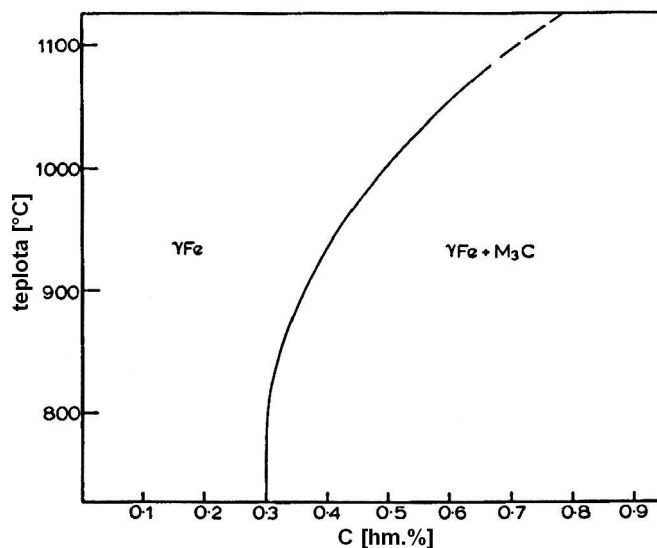
Některé práce se zabývaly i rozpustností uhlíku v tavenině v závislosti na koncentraci uhlíku, niklu a na teplotě. Graf takové závislosti je zobrazen na *obr. 16*.



**Obr. 16** – Rozpustnost uhlíku v tavenině v soustavě Fe-C-Ni při různých teplotách [32]

Je zde názorně vidět, jak zvyšující se obsah niklu snižuje rozpustnost uhlíku v tavenině tím, jak zvyšuje jeho aktivitu. Změna nastává až u koncentrací kolem 80 % niklu, ale to jsou již hodnoty ležící zcela mimo rozsah obsahů niklu v ANL a tedy mimo oblast zájmu této práce.

V práci [31] lze také nalézt graf rozpustnosti uhlíku v austenitu v závislosti na teplotě (viz. *obr. 17*). Plocha nalevo od křivky značí oblast homogenního austenitu. Při překročení této křivky směrem doprava je již překročena maximální rozpustnost uhlíku při daných podmínkách a nastane vylučování karbidu  $M_3C$  z přesyceného tuhého roztoku  $\gamma Fe$ . Data v grafu jsou platná v soustavě Fe-C-Ni pro koncentraci niklu 32,5 %.



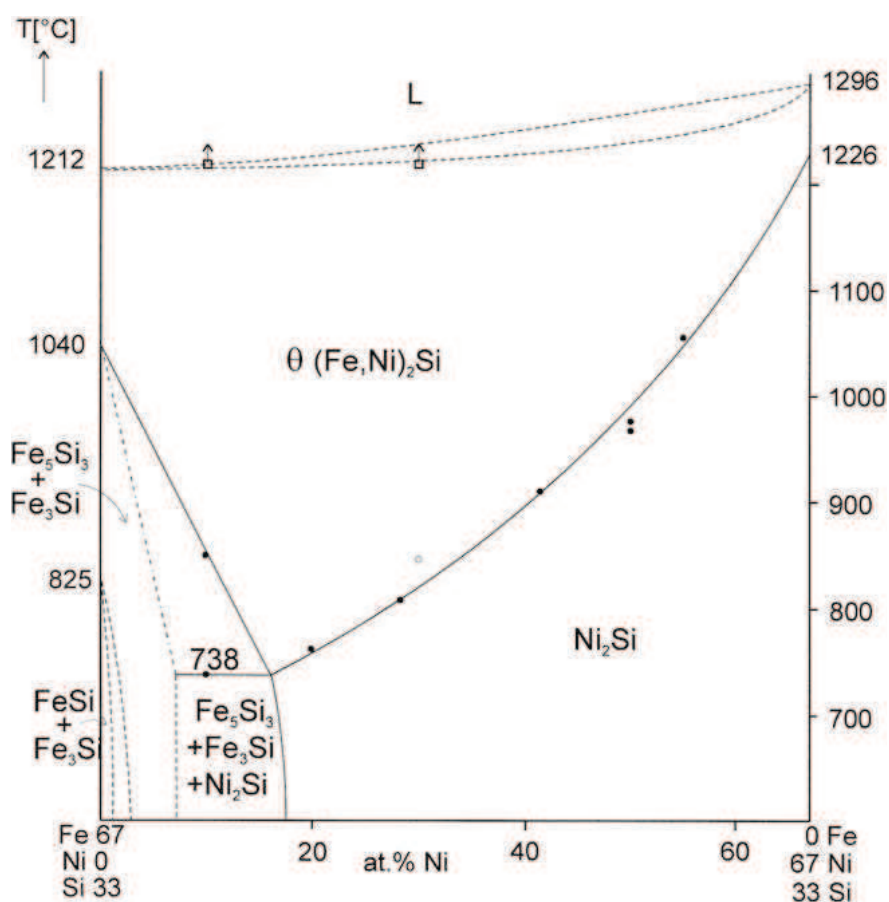
**Obr. 17** – Rozpustnost uhlíku v austenitu v soustavě Fe-C-Ni pro koncentraci niklu 32,5 % [31]

Určování teplot likvidu a solidu v soustavě Fe-C-Ni se věnuje i literatura [33], ale pozornost autorů je více zaměřena na oblast peritektické přeměny při obsazích niklu do asi 5 %, i když oblasti s vyšším obsahem niklu je také věnována určitá pozornost.



Soustavou Fe-C-Ni se zabývá více zdrojů, např. [34], [35] aj., ale ty se spíše než problematice stanovení teplot likvidu věnují různým strukturám a intermetalickým fázím vznikajícím v ternárních slitinách Fe-C-Ni s různým poměrem niklu a uhlíku, resp. experimentálnímu určování aktivit uhlíku při teplotách 800, 1000 a 1200°C v soustavě Fe-C-Ni. V literatuře [36] jsou experimentálně stanoveny interakční koeficienty niklu s uhlíkem v  $\gamma$ -železe v soustavě Fe-Ni-C, ale tato práce se zabývá pouze koncentracemi niklu do 7,9 %, tudíž hluboko pod obsahy niklu běžnými pro ANL.

Nalezení informací z ternární soustavy Fe-Ni-Si je ještě obtížnější. Práci věnujících se této tématice je málo. Příkladem může být literatura [37], která se zabývá vznikem různých intermetalických fází v systému Fe-Ni-Si, ale pozornost je věnována především části diagramu s vyšším obsahem křemíku (10 až 70 at.%), protože práce řeší problematiku týkající se transformátorových plechů. Pro ilustraci je na *obr. 18* uveden pseudobinární diagram Fe-Ni-Si s obsahem křemíku 33 at.%. Literatura, která by se zabývala problematikou stanovení teplot likvidu v této soustavě však nebyla nalezena prakticky žádná.



**Obr. 18** – Řez ternárním diagramem Fe-Ni-Si pro koncentraci 33 at.% křemíku [37]

To byla data ternárních soustav, ovšem jak již bylo řečeno, ANL jsou polykomponentní materiály a data pouze z binárních a ternárních diagramů by pro jejich popis nestačila. Avšak nalezení diagramů vícesložkových soustav, je již velice problematické.

V současné době jsou používány a dále vyvíjeny termodynamické programy umožňující konstrukci libovolných rovnovážných diagramů. Při konstrukci binárních diagramů se vychází z termodynamických dat unárních (jednosložkových) soustav, při konstrukci ternárních diagramů nebo jejich řezů (pseudobinární diagramy) pak z dat pro binární soustavy. Konstrukce diagramů vícesložkových soustav, jako jsou právě ANL, by vyžadovala použití termodynamických dat

nejen z binárních a unárních systémů, ale i z vícesložkových soustav, která však nejsou v současnosti dostatečně přesně známa [27]. Z těchto důvodů je teplota likvidu a eutektická teplota v této práci stanovována na základě provedení série experimentálních taveb a jejich následného statistického zpracování a vyhodnocení (viz. dále v experimentální části).

### 3.3 STANOVENÍ EUTEKTICKÉ KONCENTRACE UHLÍKU

Při výrobě ANL je často požadováno, aby litina měla eutektické složení. Zajištění eutektické koncentrace uhlíku je důležité z hlediska dosažení optimálních slévárensko-technologických vlastností odlévaného materiálu. Při eutektickém složení se minimalizuje dvoufázové pásmo při tuhnutí, čímž se omezuje vznik staženin a zejména ředin v objemu odlitku. U masivních odlitků je pak také menší dendritická segregace. Překročení eutektické koncentrace uhlíku u těžkých odlitků navíc vede k flotaci grafitu.

Otázkou tedy je, jak určit eutektickou koncentraci uhlíku, resp. uhlíkový ekvivalent. Dle autorů práce [38] lze uhlíkový ekvivalent u ANL určit na základě znalosti teploty likvidu. Publikované výsledky jejich experimentů ukazují, že závislost uhlíkového ekvivalentu na teplotě likvidu je lineární. Při znalosti  $T_{lik.}$  pak lze vypočítat uhlíkový ekvivalent, a to na základě následující rovnice [38]:

$$C_e = 15,7826 - 0,0096575 \cdot T_{lik.} \quad (9)$$

Dále bylo také zjištěno, že pokud leží teplota likvidu v intervalu 1203 až 1226°C, pak materiál s pravděpodobností 99 % dosahuje pevnosti vyšší než 400 Mpa, což je pro značku D5-S hodnota stanovená normou [38]. Tyto výsledky jsou založeny na statistickém vyhodnocení celkem 27 taveb ANL, bohužel složení vzorků z jednotlivých taveb se vzájemně příliš neliší. Rozsah koncentrací jednotlivých prvků při tomto experimentu je uveden v *tab. 5*.

**Tab. 5** – Obsah prvků v experimentálních tavných v literatuře [38]

prvek [%]	C	Ni	Si	Mn	Cr
<b>min.</b>	1,41	34,0	3,89	0,15	1,6
<b>max.</b>	1,97	36,8	5,26	0,20	2,0

Jak je z této tabulky vidět, je rozsah koncentrací legujících prvků velmi úzký a v podstatě pokrývá pouze jednu značku ANL, a to D5-S, které se svým složením nejvíce blíží. Tedy pro tuto značku jsou publikované závislosti velmi přesné a mají vysokou spolehlivost, nicméně je nelze zobecnit a použít na libovolné složení ANL.

Obecnější problematika stanovení uhlíkového ekvivalentu je poměrně dobře zpracována např. v literatuře [39], a to pro nízko a středně legované litiny. Celkový vliv všech obsažených prvků na hodnotu uhlíkového ekvivalentu litiny lze stanovit jako součet vlivů jednotlivých prvků v závislosti na konkrétní koncentraci každého obsaženého prvku. Uhlíkový ekvivalent litiny tedy lze vypočítat dle následující rovnice [39]:

$$C_e = \%C + \sum_{i=3}^n G_C^i \cdot \%i \quad (10)$$

Kde :

$C_e$  je uhlíkový ekvivalent litiny



%C je obsah uhlíku v litině [hm. %]

%i je obsah i-tého prvku v litině [hm. %]

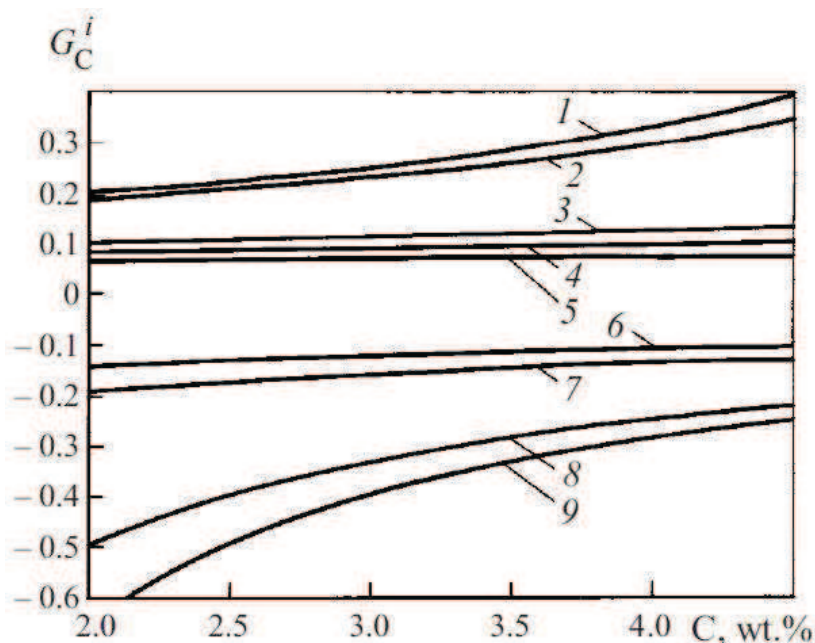
$G_C^i$  je uhlíkový ekvivalent i-tého prvku

Uhlíkový ekvivalent i-tého prvku  $G_C^i$  však není konstanta, ale je závislý na koncentraci uhlíku v litině. Velikost  $G_C^i$  pro každý prvek „i“ lze pro konkrétní koncentraci uhlíku vypočítat pomocí rovnic uvedených v tab. 6.

**Tab. 6** – Rovnice pro výpočet  $G_C^i$  [39]

Prvek „i“	Rovnice pro výpočet $G_C^i$
<b>Si</b>	$\frac{0,43}{3,03 - 0,43 \cdot \%C}$
<b>Al</b>	$\frac{0,4}{2,96 - 0,4 \cdot \%C}$
<b>Cu</b>	$\frac{0,21}{2,56 - 0,21 \cdot \%C}$
<b>Ni</b>	$\frac{0,17}{2,48 - 0,17 \cdot \%C}$
<b>Co</b>	$\frac{0,13}{2,39 - 0,13 \cdot \%C}$
<b>Mn</b>	$\frac{-0,3}{1,49 + 0,3 \cdot \%C}$
<b>Mo</b>	$\frac{-0,4}{1,28 + 0,4 \cdot \%C}$
<b>Cr</b>	$\frac{-1}{0,01 + \%C}$
<b>V</b>	$\frac{-1,3}{-0,62 + 1,3 \cdot \%C}$

Jsou-li tyto rovnice vyneseny do grafu (viz. obr. 19), je názorně vidět, že uhlíkové ekvivalenty jednotlivých prvků nejsou konstantní, ale mění se s obsahem uhlíku v litině. U silně grafitotvorných prvků (Si, Al) je tato závislost poměrně výrazná a křivky jsou konvexní. U karbidotvorných prvků (Mn, Mo, Cr, V) je závislost jejich působení na obsahu uhlíku také dosti výrazná, ale tvar křivek je konkávní. Prvky, které nejsou výrazně grafitotvorné ani karbidotvorné (Cu, Ni, Co) nezpůsobují přílišnou změnu uhlíkového ekvivalentu daného prvku se změnou obsahu uhlíku v litině.



**Obr. 19** – Uhlíkové ekvivalenty jednotlivých prvků v litině jako funkce obsahu uhlíku: 1) Si, 2) Al, 3) Cu, 4) Ni, 5) Co, 6) Mn, 7) Mo, 8) Cr, 9) V [39]

Ovšem, jak již bylo uvedeno, tyto vztahy z literatury [39] platí pro nízko až středně legované litiny, takže pro výpočet uhlíkového ekvivalentu ANL nejsou nejvhodnější, protože ANL jsou litiny vysokolegované. Nicméně jejich hlavním legujícím prvkem je nikl, který má dle *obr. 19* na uhlíkový ekvivalent litiny podstatně menší vliv než většina ostatních prvků. Koncentrace ostatních legujících prvků, vyjma niklu, je v ANL prakticky shodná s litinami nízko či středně legovanými. Z těchto důvodů by bylo možné pro přibližný výpočet uhlíkového ekvivalentu ANL použít vzorec (10) spolu se vzorci z *tab. 6*, i když výsledky budou zatíženy určitou chybou.

V literatuře zabývající se ANL však bývá pro výpočet uhlíkového ekvivalentu nejčastěji, a to téměř výhradně, uváděna empirická rovnice, která počítá s vlivem uhlíku, křemíku a niklu. Tou je již dříve zmiňovaná rovnice (4):

$$C_e = \%C + 0,33 \cdot \%Si + 0,047 \cdot \%Ni - 0,0055 \cdot \%Ni \cdot \%Si \quad (4)$$

Tato rovnice má původ v práci [14] a platí pro obsah niklu do 37 % a křemíku do 3 %. Z tohoto rozmezí koncentrací je patrné, že neplatí pro celý rozsah normovaného složení ANL, protože existují i značky s obsahem křemíku až do 6 %. Navíc tato rovnice nepostihuje vliv ostatních legujících prvků. ANL však mohou obsahovat ve vyšší koncentraci i jiné prvky než jen nikl a křemík, a to zejména mangan, měď a chrom. Tyto prvky také mohou mít nezanedbatelný vliv na eutektickou koncentraci.

Pro přesné nastavení eutektického složení je možné vycházet z termodynamické rovnováhy aktivity uhlíku při eutektické teplotě. Při eutektické teplotě má Raoultova aktivita uhlíku v tavenině, která je v rovnováze s vylučujícím se grafitem (při použití standardního stavu čistá látka – grafit), jednotkovou aktivitu. To platí jak pro soustavu Fe-C tak i pro soustavu Fe-C-Si...-Me [27].

$$a_C^{Fe-C} = a_C^{Fe-C-...-Me} \quad (11)$$

$$\ln \gamma_C^{Fe-C} + \ln N_C^{Fe-C} = \ln \gamma_C^{Fe-C-...-Me} + \ln N_C^{Fe-C-...-Me} \quad (12)$$

$$\varepsilon_C^C \cdot N_C + \ln N_C^{Fe-C} = \varepsilon_C^C \cdot N_C^{Fe-C-...-Me} + \sum \varepsilon_C^{Me} \cdot N_{Me} + \ln N_C^{Fe-C-...-Me} \quad (13)$$

$\varepsilon_C^C, \varepsilon_C^{Me}$  - interakční koeficienty vlivu C a prvků Me na aktivitu uhlíku.

$N_C^{Fe-C}, N_C^{Fe-C-...-Me}$  - atomový zlomek uhlíku v soustavě Fe-C a v soustavě Fe-C-...-Me.

Závisle proměnnou v rovnici je  $N_C^{Fe-C-...-Me}$ . Pro určité chemické složení tavby jsou ostatní veličiny v rovnici (13) konstantní a rovnici pak lze upravit na tvar (14) :

$$A - \varepsilon_C^C \cdot N_C^{Fe-C} = B + \ln N_C^{Fe-C-...-Me} \quad (14)$$

Kde:

$$A = \varepsilon_C^C \cdot N_C^C + \ln N_C^{Fe-C} \quad (15)$$

$$B = \sum \varepsilon_C^{Me} \cdot N_C \quad (16)$$

Hodnoty interakčních koeficientů použitých při výpočtu eutektické koncentrace v ANL jsou uvedeny v *tab. 7*.

**Tab. 7** – Hodnoty interakčních koeficientů  $\varepsilon_C^{Me}$  v soustavách Fe-Me-C [12]

prvek - Me	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mg	Cu
$\varepsilon_C^{Me}$	7,8	9,72	-2,7	7,0	6,45	-5,1	2,9	8,0	4,1

Prvky s kladnou hodnotou interakčního koeficientu zvyšují aktivitu uhlíku a současně snižují jeho rozpustnost v tavenině a posouvají tak eutektický bod k nižším koncentracím uhlíku. Analogicky prvky se zápornou hodnotou interakčního koeficientu aktivitu uhlíku snižují, zvyšují jeho rozpustnost a posouvají eutektický bod k vyšším koncentracím uhlíku.

Rovnice (14) pak slouží jako základ pro výpočet  $N_C^{Fe-C-...-Me}$ . Největší vliv na polohu eutektického bodu v ANL má uhlík, křemík, nikl a v případě vyšší koncentrace také chrom. Vliv ostatních prvků je s ohledem na jejich nízkou koncentraci (fosfor, síra, hořčík), případně nízkou hodnotu interakčního koeficientu (mangan) méně významný [27]. Nicméně u ANL s vysokým obsahem manganu (příp. mědi u značek s lupínkovým grafitem) je nutné počítat i s vlivem těchto prvků na polohu eutektického bodu. Tento výpočet eutektické koncentrace uhlíku je možné použít nejen pro ANL s kuličkovým grafitem, ale i pro značky s grafitem lupínkovým.

Teoreticky existuje i možnost, že materiály s rozdílným chemickým složením budou mít stejný nebo velmi podobný uhlíkový ekvivalent. To však neznamená, že musí mít shodné také mechanické či jiné vlastnosti. Touto problematikou se zabývali autoři práce [40]. Pomocí změn v koncentracích uhlíku, křemíku a niklu nastavovali různé uhlíkové ekvivalenty (určené dle rovnice (4)) v rozsahu 3,51 až 5,04 a měřili odpovídající pevnost,  $R_{p0,2}$ , tažnost a tvrdost výsledné ANL. Pozornost byla věnována také tvaru a velikosti částic grafitu. Výsledky ukazují, že s rostoucím uhlíkovým ekvivalentem mírně klesá pevnost ANL, a to bez ohledu na to, jestli vyššího  $C_e$  bylo dosaženo zvyšováním obsahu uhlíku, křemíku či niklu. U vlivu na  $R_{p0,2}$  je tomu však jinak. Je-li vyššího  $C_e$  dosaženo zvyšováním koncentrace křemíku, dochází k postupnému zvyšování  $R_{p0,2}$ , zatímco je-li toho dosaženo rostoucí koncentrací niklu, pak dochází naopak k mírnému poklesu  $R_{p0,2}$ . Růst obsahu uhlíku nemá na  $R_{p0,2}$  v podstatě vliv. Zvětšování  $C_e$  pomocí uhlíku a křemíku vede ke zvyšování tažnosti. V případě křemíku je toto zvyšování mírné, v případě uhlíku je výraznější. Naproti tomu u niklu je tento vliv opačný, niklem

zvětšované  $C_e$  vede k poklesu tažnosti. Na tvrdost nemá zvyšování  $C_e$  prakticky žádný vliv a to bez ohledu na to, kterým z těchto tří prvků bylo zvýšení  $C_e$  dosaženo. Na metalografických výbrusech bylo zjištěno, že navyšování  $C_e$  pomocí křemíku vede ke zmenšení velikosti nodulí grafitu a ke zvýšení jejich počtu. V případě uhlíku a niklu je efekt podobný, i když o něco méně výrazný. U vlivu na základní kovovou matici bylo zjištěno, že největší vliv má nedostatečný obsah niklu. Při koncentracích niklu pod 13,5 % byl ve struktuře mimo austenitu nalezen i perlit a martenzit. V některých vzorcích s nízkým obsahem uhlíku byly také nalezeny drobné částice karbidu železa [40].

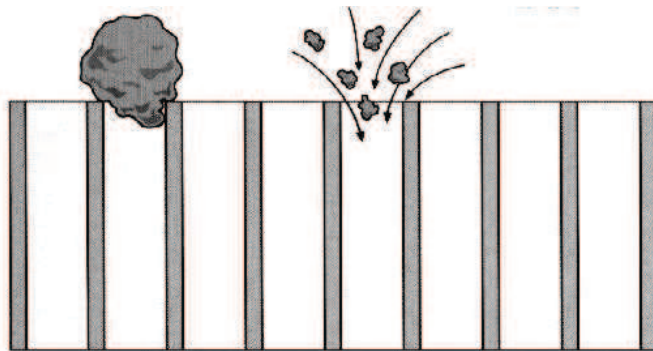
### 3.4 FILTRACE ANL

V současné době je již filtrace taveniny běžně používána prakticky u všech slévárenských slitin. Proto bylo jedním z cílů této práce i ověření možnosti a účelnosti použití filtrace při odlévání těžších odlitků z ANL. Hlavním cílem filtrace je odstranění vměstků, strusky, částec ostřiva apod. a tím zlepšení vnitřní jakosti odlitků. Existuje několik mechanismů filtrace a několik základních typů používaných filtrů. Filtrace ANL není hlavním a jediným tématem této práce, proto základní typy filtrů a mechanismy filtrace sice budou v následujících kapitolách blíže popsány, ale spíše jen minimum pro vysvětlení a pochopení základní problematiky filtrace.

#### 3.4.1 Mechanizmy filtrace

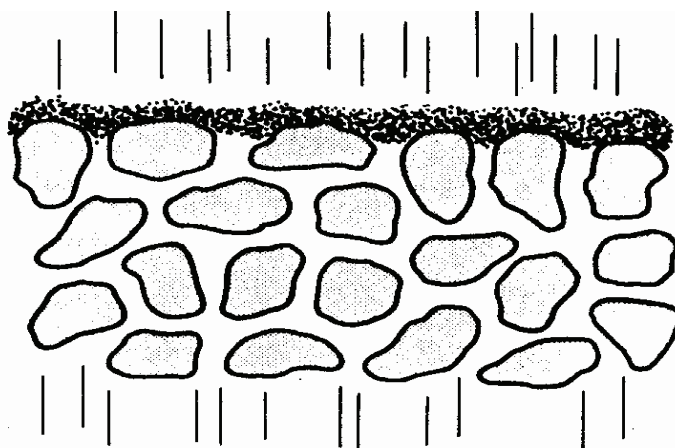
Rozlišují se tři základní mechanismy zachycování vměstků ve filtrech.

**Filtrace cezením** – je znázorněna na *obr. 20* a spočívá v zachycování vměstků na čelní přítokové straně filtru. Velikost těchto vměstků musí být větší než je velikost otvorů filtru. Tímto způsobem lze zachytit pouze větší částice a především vměstky tvořící blány [41].



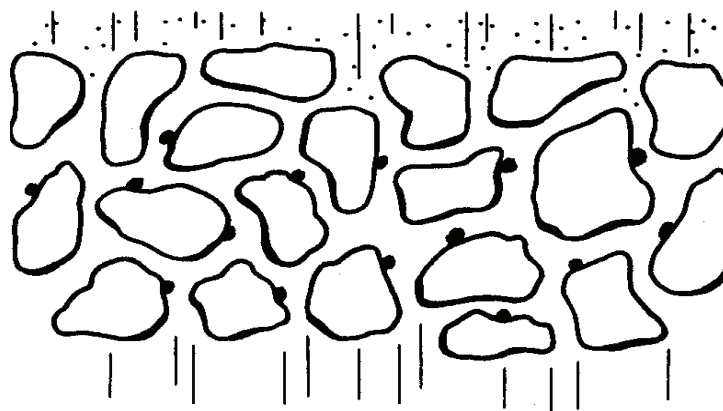
**Obr. 20** – Filtrace cezením [41]

**Tvorba filtračního koláče** – ta je znázorněna na *obr. 21* a plynule navazuje na zachycení prvních vměstků na čele filtru. Na těchto větších částicích se postupně zachycují stále menší a menší vměstky, čímž se zpomaluje průtok kovu až se nakonec filtr zcela ucpe. Mechanismem filtračního koláče jsou zachyceny i velmi malé vměstky s rozměry kolem 1 až 5  $\mu\text{m}$  [41].



**Obr. 21** – Tvorba filtračního koláče [41]

**Hloubková filtrace** – ta probíhá v celém objemu filtru. Její princip je znázorněn na *obr. 22* a spočívá v nalepování vměstků na stěny filtru. Následně se jednotlivé částice vměstků nalepené na stěnách keramického filtru začínou shlukovat a tvořit tzv. „mosty“, jejichž okraje jsou zakotvené na stěnách filtru. Účinnost hloubkové filtrace je ovlivňována teplotou kovu, chemickým složením materiálu filtru a vměstků, jejich vzájemnou smáčivostí a také tvarem kanálů filtru [41].



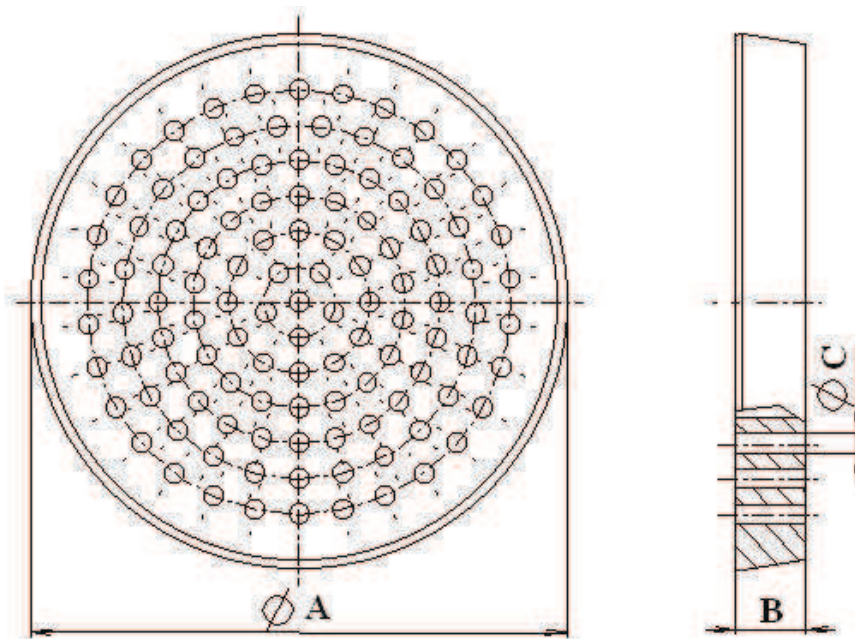
**Obr. 22** – Hloubková filtrace [41]

### 3.4.2 Základní druhy filtrů

Keramické elementy určené k zachycování vměstků ve vtokových soustavách odlitků se obvykle rozdělují na licí sítko (tzv. cedítka) a filtry [41].

**Licí sítko (tzv. cedítka)** – jsou plochá keramická tělíska s přímými kruhovými otvory (*viz. obr. 23*) průměru nejčastěji 4 až 10 mm a tloušťkou 6 až 12 mm. Jejich hlavním účelem je zachycování primární strusky na počátku lití, kdy jamka ještě není zaplněná. Licí sítko bývají nejčastěji umístěována do osazení na dně vtokové jamky v přechodu do vtokového kůlu. Mimo zachycování hrubých nečistot mají i jiné kladné účinky. Napomáhají rychlejšímu zaplnění vtokové jamky a zamezují vzniku vírů nad vtokovým kulem, čímž omezují turbulence kovu. Vměstky jsou zachycovány výhradně mechanismem cezení. Celkový průřez otvorů v cedítce by měl být větší než průřez vtokového kůlu. Cedítka zadrží zejména hrubší částice strusky, jemnější vměstky se však na cedítce nezachytí [41].





**Obr. 23** – Licí sítko, tzv. cedítka [41]

**Filtry** – fungují poněkud jiným způsobem. Velikost pórů je u filtrů podstatně menší, než u cedítek, obvykle okolo 1 až 2,5 mm. Rařinační mechanismus filtrů je sice také řástečně podobný jako u cedítek, tedy spořívá v blokování větších řástic vměstků na řítokové straně filtru. Navíc se však při zachycování vměstků uplatňuje i mechanismus tvorby „řitračního koláče“ a „řloubková řiltrace“. Tímto způsobem lze zachytit i vměstky podstatně menší, než je velikost otvorů filtru, a to až s velikostí řněkolika mikrometrů [41].

Podle tvaru filtru a mechanismu řiltrace je možné filtry rozdělit na ploché a objemové.

### ***Ploché filtry***

Ploché filtry působí, díky svým „řvourozměrným“ pórům podobně, jako cedítka. Neřistoty větší, než je rozměr otvorů filtru, řástečně i řástice menší, se zachycují na řítokové straně filtru, kde se postupně tvoří řitrační koláč. Neuplatňuje se u nich řloubková řiltrace (nebo je její podíl pouze malý). Jako ploché filtry se používají kovové řřížky, řástěji však řtané řtextilie, vyrobené ze řárovzdorných vláken [41].

**Kovové řřížky** – jsou použitelné pouze pro slitiny s nižší licí teplotou, typicky pro slitiny řhliníku. Tyto filtry jsou vytvořeny ze řířky z ocelového řrátu s velikostí ok řasi 2 až 3 mm, která se vystřihne na velikost větší než je řřutočný profil v místě založení řřížky. Tyto řřížky pak bývají umístěny do jednoduché řitrační komůrky vytvořené řrozšířením profilu ve struskováku. Vzhledem k tomu, že vměstky ve řlitolinách řhliníku mají nejřástěji řarakter řblan, bývá účinnost kovových řřížek poměrně dobrá. Jejich výhodou je i nízká cena. Řurřitou nevýhodou však je, že po odlití zůstává ocelový řiltr zatuhnutý ve řtokové soustavě a dostává se s ní v podobě řvratného materiálu zpět do řtavicí pece. To může způsobovat nežádoucí zvyšování obsahu řželeza v řtavenině [41].

**Řtaninové filtry** – jsou zobrazeny na *obr. 24*. Vzhled řtěchto filtrů je obdobný jako u kovových řitračních řřížek, ale místo z kovových řrátků jsou řtkány ze řárovzdorných řtanin. Jednotlivé řprameny vláken tvořící řřížku filtru jsou řplétány řložitým způsobem z řmnoha řjemných vláken, obdobně jako např. řlana. Filtry se mohou řlišit řprofilem a řtloušťkou jednotlivých řpramenů, ze kterých je řfiltr řtkán a také velikostí řok filtru. Řárovzdorná řtanina je řvyrobena z vláken

amorfního  $\text{SiO}_2$  o čistotě 97 až 99 %. Po utkání se filtr tepelně a chemicky dále zpracovává, což vede k dalšímu zvýšení podílu  $\text{SiO}_2$  a také ke zvýšení tuhosti filtru a ke zlepšení vlastností za vysokých teplot. Maximální teplota odlévaného kovu je  $1620^\circ\text{C}$ , někdy se udává i možnost použití těchto filtrů až do teplot  $1700^\circ\text{C}$ . Pro zvýšení efektivity filtrace bývá někdy textilie filtru aktivována napuštěním speciální pryskyřicí. Vměstky s obsahem oxidů železa pak reagují s touto pryskyřicí za vzniku fayalitového ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) filmu. Ten snižuje povrchové napětí mezi materiálem filtru a vměstky, čímž pak dochází k pevnějšímu zakotvení vměstků na filtru, takže v podstatě dochází k jakési formě hloubkové filtrace. Při odlévání LKG se takto zlepšuje i zachycování vměstků na bázi  $\text{MgO}$  [41].

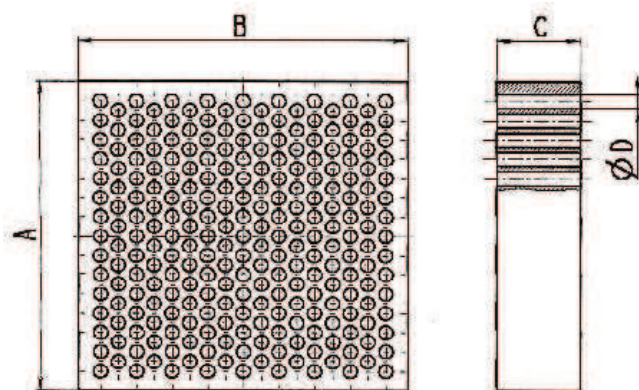


**Obr. 24** – Tkaninové filtry různých typů [42]

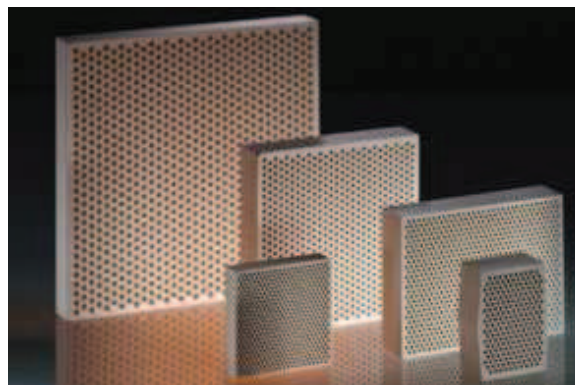
### **Objemové filtry**

Objemové filtry využívají pro filtraci jednak filtračního mechanismu tvorby filtračního koláče a jednak také schopnosti hloubkové filtrace. Účinnost hloubkové filtrace je rozdílná u různých typů filtrů [41].

**Lisované filtry** – (viz. *obr. 25* a *obr. 26*) jsou principiálně podobné cedítkům. Vyrábí se lisováním polosuché keramické směsi v kovových formách. Při tom se zároveň vylisují i přímé průtočné otvory, které mají nejčastěji kruhový průřez. Otvory jiného průřezu jsou spíše výjimkou. Vylisované filtry jsou následně žíhány. Různé druhy lisovaných filtrů se vzájemně liší plošnými rozměry, tloušťkou filtru, průměrem otvorů a jejich hustotou v průtočné ploše filtru. Průměr otvorů bývá nejčastěji kolem 1,8 až 2,5 mm, tloušťka pak v rozmezí 12 až 22 mm. Průtočná plocha je 45 až 58 % z celkové plochy filtru. Materiál filtru je volen podle druhu odlévaného kovu [41].

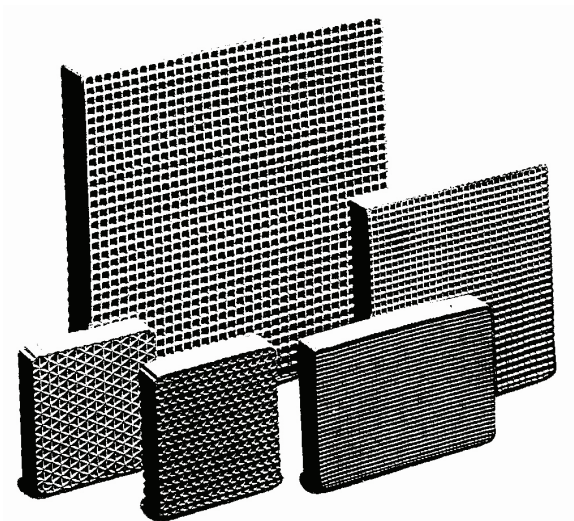


**Obr. 25** – Lisovaný filtr [41]

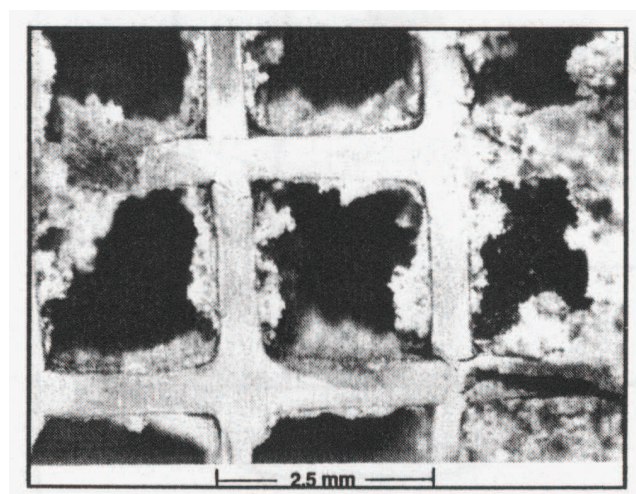


**Obr. 26** – Různé velikosti lisovaných keramických filtrů [43]

**Extrudované (protlačované) filtry** – jedná se rovněž o filtry s přímými kanály. Vyrábí se protlačováním keramické hmoty plastické konzistence přes nástroj s nejčastěji čtvercovými či obdélníkovými otvory (viz. obr. 27). Stěny mřížky extrudovaného filtru jsou ve srovnání s filtry lisovanými výrazně tenčí. Z tohoto důvodu pak mají větší průtočný průřez (kolem 65 %) a nižší tepelnou kapacitu. Také čtvercový či obdélníkový průřez kanálů filtru je výhodnější pro mechanismus hloubkové filtrace než je průřez kruhový, a proto mají tyto filtry poměrně vysokou účinnost. Na obr. 28 je dobře patrné velké množství vměstků zachycených na stěnách extrudovaného filtru [41].



**Obr. 27** – Extrudovaný filtr [41]

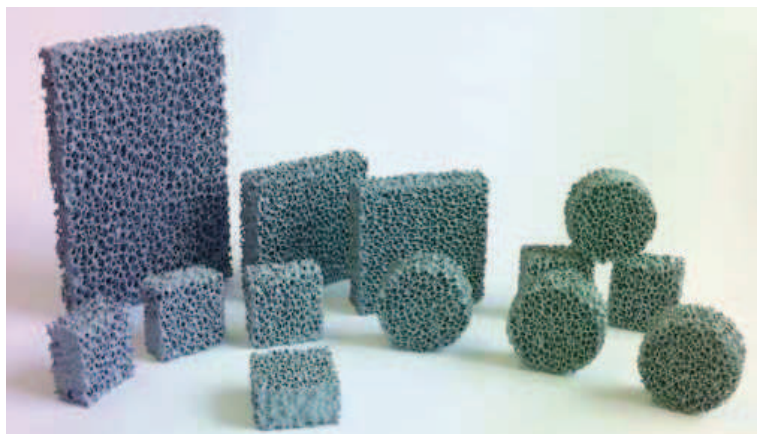


**Obr. 28** – Vměstky zachycené v extrudovaném filtru [41]

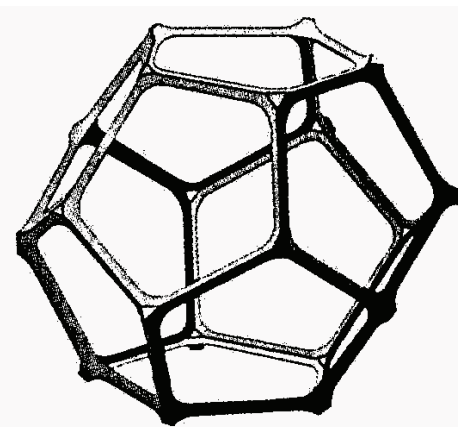
Hustota extrudovaných filtrů se udává jako počet otvorů na čtvereční palec a označuje se jako csi (cells per square inch). Nejčastěji se používají filtry s hustotou 50 až 300 csi. Tento typ filtrů se používá zejména pro filtraci litin, je však možné jej použít i pro filtraci ocelí. Pro LKG se obvykle doporučuje hustota 50 až 100 csi, pro LLG pak filtry hustější, a to 200 až 300 csi [41].

**Pěnové filtry** – jsou zobrazeny na obr. 29 a jsou tvořeny systémem pentaedrických buněk (viz. obr. 30), které jsou vzájemně propojeny. Výroba pěnových filtrů spočívá v napuštění polyuretanové pěnové matrice vhodnou keramickou suspenzí. Následuje žhání, při kterém dojde k vypálení pěny a vznikne keramická kostra filtru [41].





**Obr. 29** – Pěnové keramické filtry [44]



**Obr. 30** – Buňka pěnového filtru [41]

Filtry se vzájemně liší jednak svým tvarem a zejména také velikostí pórů, ta je dána pórovitostí použité pěny. Pórovitost je udávána jako počet pórů na délkový palec a je označována jednotkou ppi (pores per inch). Pro filtraci kovu ve vtokových soustavách odlitků se nejčastěji používají filtry s pórovitostí 10, 20 a 30 ppi. Čím vyšší je ppi, tím je filtr hustější. Hustota filtru se volí s ohledem na tekutost kovu a na rychlost zanášení filtru. Průtočný průřez pěnových filtrů je závislý především na robustnosti keramické kostry filtru a může být až 80 % z jeho celkové plochy. Při průtoku kovu pěnovým filtrem dochází ke vzniku místních vírů a k častým změnám směru proudění, v důsledku čehož pak vměstky přichází do častého kontaktu se stěnami filtru. A to jsou ideální podmínky pro účinnou hloubkovou filtraci. Takto jsou pak na stěnách filtru zachycovány vměstky, jejichž rozměry jsou podstatně menší než rozměry pórů filtru. Navíc se vměstky zachycují i vzájemně mezi sebou a tvoří tzv. „mosty“, které jsou zakotvené na stěnách filtru. Mechanismus hloubkové filtrace umožňuje účinně odstraňovat i jemné vměstky, a to až do velikosti 3 až 5  $\mu\text{m}$ . Se zvyšujícím se množstvím takto zachycených vměstků se však filtr postupně ucpává, až se nakonec stane zcela neprůtočný. Průtočná kapacita filtru je tak závislá na množství vměstků v tavenině, na velikosti pórů filtru a na vzájemných adhezních silách mezi jednotlivými vměstky a filtrem, tzn. že závisí i na materiálu filtru. Ve srovnání s ostatními typy filtrů je schopnost hloubkové filtrace zdaleka největší právě u pěnových filtrů, což je také jejich hlavní výhodou. U plochých filtrů sice dochází k určitému dílčímu zachycování vměstků působením povrchových sil, nicméně se nejedná o hloubkovou filtraci, protože zde chybí efekt hloubky filtru. U filtrů lisovaných a extrudovaných dochází k filtraci zejména mechanismem vzniku filtračního koláče, hloubková filtrace se zde však také částečně uplatňuje, avšak tloušťka filtru nemá na celkovou účinnost filtrace nijak zásadní vliv. Zatímco u pěnových filtrů se na hloubkové filtraci podílí celá tloušťka filtru, tudíž čím je tloušťka filtru větší, tím je i filtrace účinnější [41].

## 4 METODIKA MĚŘENÍ A PODMÍNKY EXPERIMENTŮ

Většina prováděných experimentů byla zaměřena na stanovení teplot likvidu a eutektických teplot pro ANL různého chemického složení. Během těchto experimentů byly získány křivky ochlazování, z jejichž derivací byly následně tyto teploty odečítány.

Dále popisované experimenty probíhaly ve školní slévárně Odboru slévárenské technologie na Vysokém učení technickém v Brně. K tavení byla používána elektrická indukční pec s kyselou výdusku s maximální hmotností vsázky 40 kg. Odlévání probíhalo postupně po jednom odlitku z ruční pánve o objemu odpovídajícím asi 7 kg kovu. Bezprostředně po odlití byla hladina kovu zasypána suchým pískem. Očkování a modifikace byly prováděny polévací metodou v této lici pánvi. Očkovalo se pomocí FeSi75 a modifikace probíhala přidávkem předslitiny NiMg6. Chemické složení odlitých vzorků bylo stanovováno ve zkušebních laboratořích Žďas a.s., a to na spektrálním optickém analyzátoru ARL 4460.

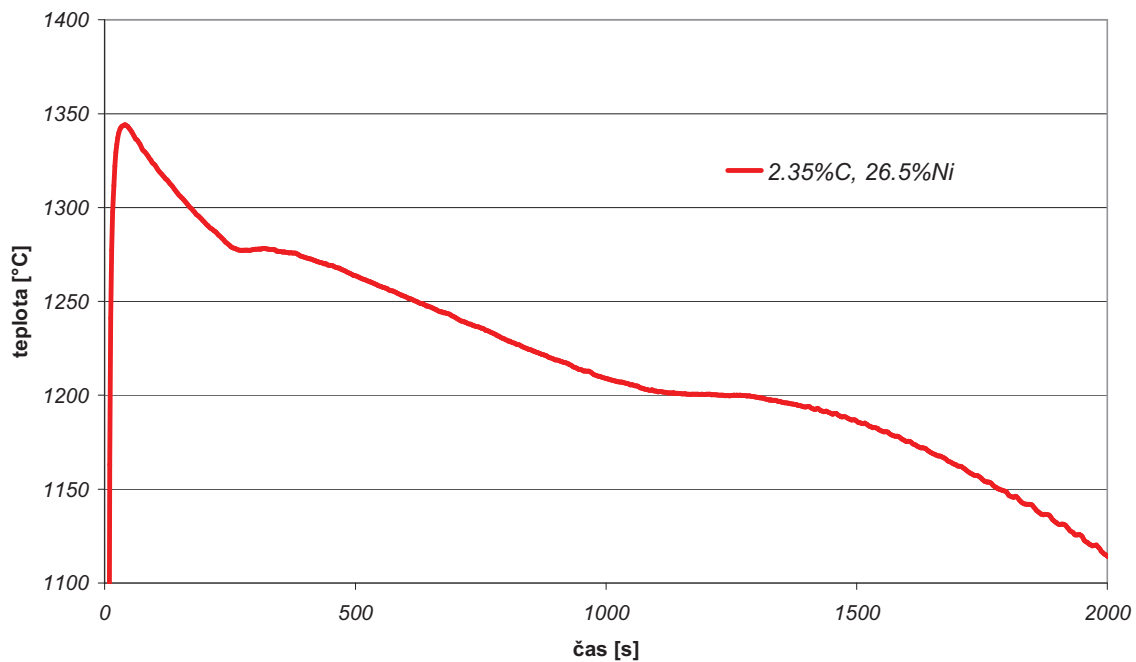
Teplota v průběhu tuhnutí a chladnutí byla zaznamenávána pomocí termočlánku umístěného v trubičce z křemenného skla v ose každého zkušebního odlitku. Zpočátku byly používány termočlánky typu B, později se přešlo na typ S, protože ten dává ve stejném rozsahu teplot větší termoelektrické napětí. Pro ověření správnosti měření bylo celkem 6 kusů termočlánků typu S později dodatečně podrobeno kontrolní kalibraci v akreditované kalibrační laboratoři Institutu pro testování a certifikaci v Brně. V *tab. 8* jsou uvedeny hodnoty zjištěné při kalibraci.

**Tab. 8** – Výsledky zjištěné při kalibraci termočlánků typu S

skutečná teplota [°C]	teplota naměřená zkoušeným termočlánkem [°C]											
	termo- článek č. 1	rozdíl	termo- článek č. 2	rozdíl	termo- článek č. 3	rozdíl	termo- článek č. 4	rozdíl	termo- článek č. 5	rozdíl	termo- článek č. 6	rozdíl
<b>500</b>	499,9	-0,1	499,5	-0,5	499,8	-0,2	498,6	-1,4	499,5	-0,5	500,3	0,3
<b>540</b>	539,8	-0,2	539,8	-0,2	540,1	0,1	539,1	-0,9	539,9	-0,1	541,7	1,7
<b>600</b>	600,1	0,1	600,1	0,1	600,5	0,5	599,3	-0,7	600,2	0,2	601,0	1,0

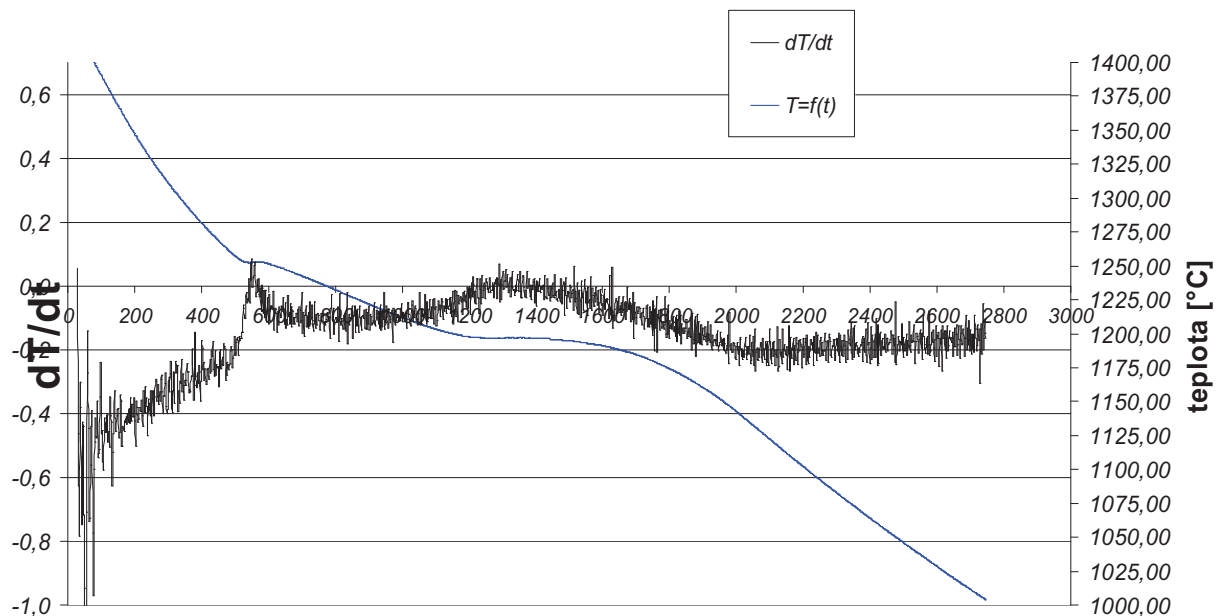
Z této tabulky je tedy vidět, že chyby u zkoušených termočlánků jsou poměrně malé. Pohybují se řádově v desetinách stupně Celsia. Maximální zjištěná odchylka je 1,7°C, což je při měření teplot likvidu a eutektických teplot ANL pro potřeby provozu přijatelné.

K digitalizaci signálu z termočlánků byl používán AD převodník OMB-DAQ-55 s rozšiřujícím modulem OMB-PDQ2. Měřené teploty byly průběžně zaznamenávány do datového souboru na disku PC pomocí softwaru DaqView 7.0. Tato data byla následně zpracována v programu MS Excel, tím byly získány grafické podoby křivek ochlazování. Příklad takovéto křivky je uveden na *obr. 31*.



**Obr. 31** – Příklad křivky ochlazování získané z naměřených hodnot

Teploty likvidu a eutektické teploty nebyly odečítány přímo z těchto křivek, ale z jejich prvních derivací. Před derivací však byly křivky ochlazování nejprve vyhlazeny sestrojením náhradní křivky ochlazování. Ta byla získána nahrazením několika po sobě jdoucích bodů jejich průměrnou hodnotou. Příklad takto získané derivace křivky ochlazování i s vlastní křivkou ochlazování (hladká křivka modré barvy) je uveden na obr. 32.



**Obr. 32** – Příklad derivace křivky ochlazování

## 4.1 ZKUŠEBNÍ ODLITEK

Práce je zaměřena do oblasti těžkých odlitků. Ve školní slévárně na VUT v Brně je však k dispozici pouze 40-ti kg tavící indukční pec, nehledě na to, že odlévat několik sérií zkušebních odlitků s vysokým obsahem niklu o hmotnosti několika tun by bylo velice nákladné. Z těchto důvodů byl zvolen jednoduchý zkušební odlitek ve tvaru válce, tvořený sibalovou izolací nálitku o vnitřním průměru 80 mm a délce přibližně 120 mm. Tloušťka izolace byla asi 15 mm. Modul odlitku bez izolace činí  $M_{\text{neiz.}} = 1,5$  cm. V práci [45] byly používány tytéž izolace nálitků a na základě měření doby tuhnutí odlitků z LLG v této izolaci a bez ní zde byl vypočten faktor posunu modulu pro tuto izolaci  $f_M = 1,65$ . Za použití tohoto  $f_M$  byl na základě rovnice (17) vypočten modul experimentálního odlitku. Tento modul je  $M_{\text{iz.}} = 2,47$  cm. Jak je vidět, tak použitím tepelné izolace došlo ke zvýšení modulu odlitku o téměř 65 %.

$$M_{\text{iz.}} = f_M \cdot M_{\text{neiz.}} \quad (17)$$

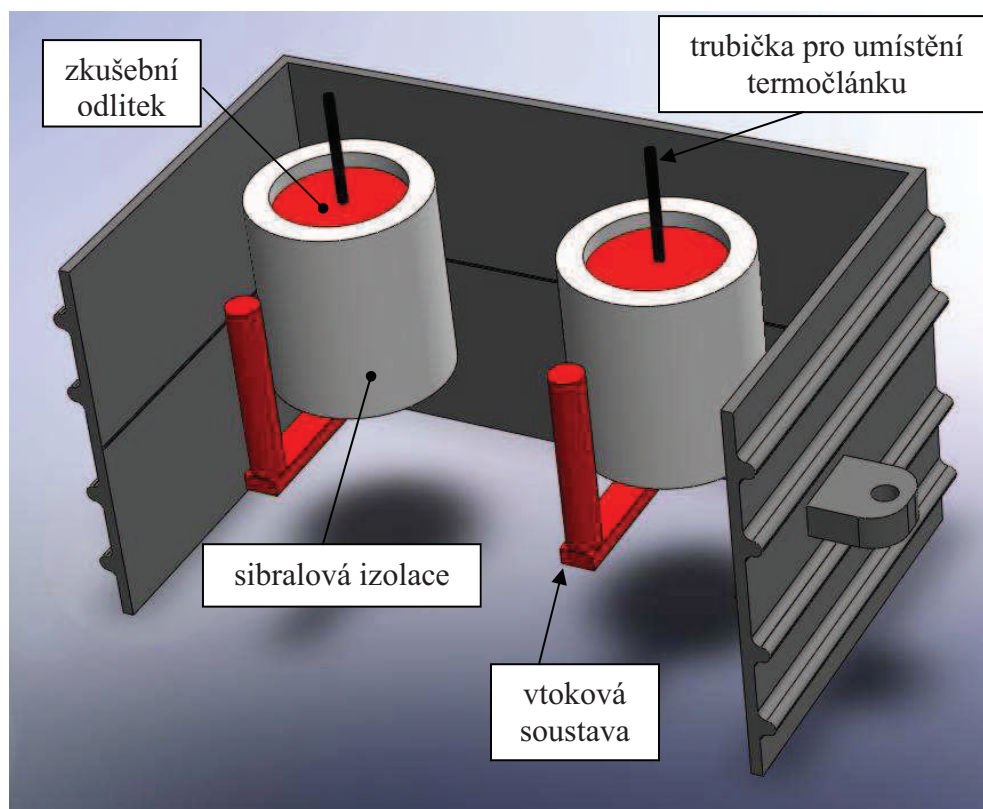
Kde:

$M_{\text{iz.}}$  je modul izolovaného odlitku [cm]

$M_{\text{neiz.}}$  je modul neizolovaného odlitku [cm]

$f_M$  je faktor posunutí modulu [-]

Použitím izolace se dosáhlo prodloužení doby tuhnutí a částečně se tím simuloval průběh tuhnutí hmotnějšího odlitku. Forma byla zhotovena z jednotné bentonitové formovací směsi, v níž byly zaformovány sibalové izolace. V každé formě byly umístěny dvě tyto izolace, tedy dva odlitky, viz. obr. 33.



**Obr. 33** – Umístění experimentálních odlitků ve formě

Zaústění vtokové soustavy bylo zespodu pomocí struskováku. Každý odlitek měl samostatný vtok. Hmotnost kovu v jednom odlitku byla přibližně 5 kg. Doba tuhnutí takového odlitku se pak v závislosti na chemickém složení odlitého materiálu pohybovala okolo 25 min. Tyto zkušební odlitky byly používány při experimentálním zjišťování vlivu uhlíku, niklu a křemíku na teplotu likvidu a eutektickou teplotu a při statistickém plánovaném experimentu.

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V rámci projektu MPO TANDEM, ev. č. FT-TA3/007 „Výzkum a optimalizace výroby vysokolegovaných litin pro odlitky“ a následně i pro potřeby této dizertační práce bylo odlito 17 taveb ANL. V těchto tavebách bylo téměř 70 zkušebních odlitků různých typů a velikostí, nejčastěji se však jednalo o kýlové bloky Y2, Y3 a zejména Y4 a o výše zmíněné zkušební odlitky lité do sibalových izolací. V příloze 1 je uvedena souhrnná tabulka odlitých taveb a vzorků z nich, spolu se základními naměřenými charakteristikami.

### 5.1 EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ Vlivu C, Ni a Si na teplotu likvidu a eutektickou teplotu

Uhlík, nikl a křemík jsou tři prvky, které jsou v ANL obsaženy vždy a v nejvyšší koncentraci a nejvíce ovlivňují teplotu likvidu a eutektickou teplotu. Stanovení jejich vlivu bylo rozděleno na tři části:

- Cílem první části experimentů bylo stanovit vliv na teplotu likvidu a na eutektickou teplotu každého z těchto tří prvků samostatně.
- Ve skutečnosti však neovlivňují tyto prvky teplotu likvidu a eutektickou teplotu pouze každý samostatně, ale i společně tím, jak mění aktivity zbylých prvků v tavenině. Vzhledem k tomu bylo cílem další části pomocí regresní analýzy dat získaných z dříve provedených taveb vypočítat teplotu likvidu a eutektickou teplotu pro libovolné chemické složení ANL.
- Cílem třetí části pak bylo sestavit vhodný statistický plán experimentu, na jeho základě provést sérii experimentálních taveb a s pomocí takto naměřených výsledků stanovit vliv uhlíku, niklu a křemíku společně.

Dále následovalo porovnání výsledků těchto dvou statistických přístupů, tedy regresní analýzy a plánovaného experimentu a vyhodnocení, který z těchto výpočtů dává přesnější výsledky. Ten byl následně zapracován do počítačového programu s názvem *Výpočet licí teploty litin Ni-resist*, který po zadání chemického složení taveniny vypočte teplotu likvidu, eutektickou teplotu a jiné důležité metalurgické parametry.

#### 5.1.1 Experimentální stanovení vlivu C na teplotu likvidu a eutektickou teplotu

Uhlík je prvek, který nejvíce ovlivňuje jak teplotu likvidu, tak i eutektickou teplotu. Experiment byl koncipován tak, že koncentrace uhlíku je v rozsahu 1,73 až 3,12 % odstupňována do čtyř odlitků (jeden odlitek = jedno složení). Toto rozmezí koncentrací pokrývá prakticky všechny normované ANL. Koncentrace ostatních prvků, zejména niklu a křemíku byla udržována konstantní. Obsah niklu byl zvolen 20 % a křemíku 1,6 %, což odpovídá obsahu těchto prvků u nejčastěji vyráběné značky D-2. Konkrétní chemické složení jednotlivých odlitých vzorků je uvedeno v *tab. 9*.



**Tab. 9** – Chemické složení vzorků z tavby pro stanovení vlivu uhlíku

č. vzorku	%C	%Ni	%Si	%Mn	%Cr	%P	%S	%Mg
1.2	3,12	20,2	1,50	0,8	1,7	0,035	0,008	0,050
2.2	2,51	20,3	1,60	0,7	1,5	0,030	0,007	0,055
3.2	2,13	20	1,55	0,65	1,3	0,025	0,007	0,060
4.2	1,73	19,8	1,50	0,6	1,1	0,020	0,007	0,040
<b>průměr</b>	-	20,08	1,54	-	-	0,028	0,007	0,051
<b>směrodatná odchylka</b>	-	0,19	0,04	-	-	0,006	0,000	0,007

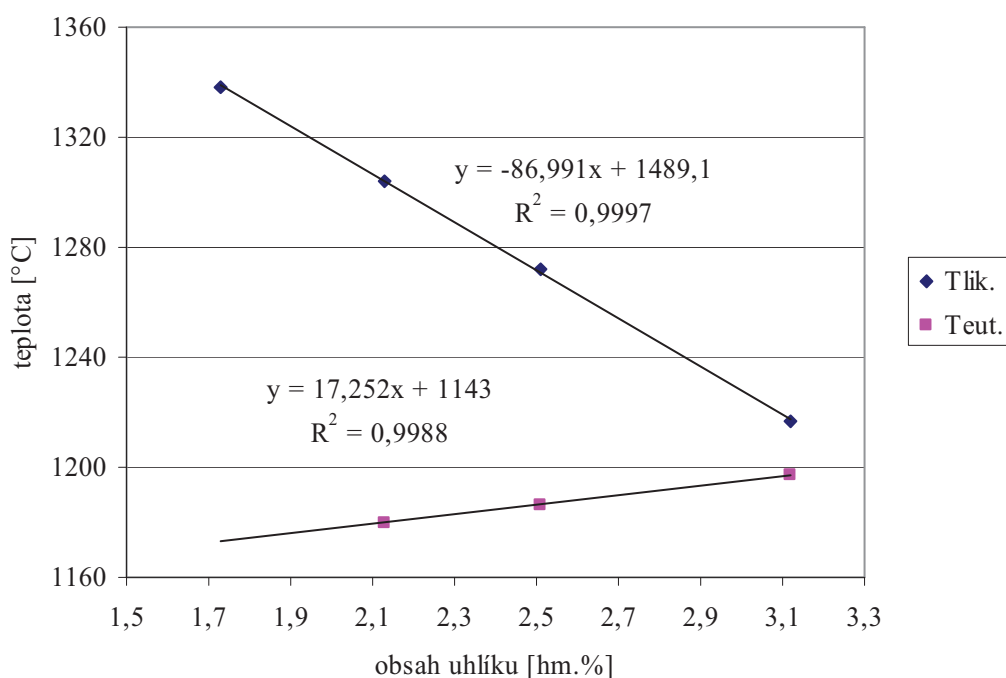
Jako první byl odlit vzorek 1.2 s obsahem uhlíku 3,12 %, pak následovalo „naředění“ hlubokotažným plechem a dolegování niklu a křemíku na původní koncentraci a odlití dalšího vzorku. Během postupného dolegování po odlití každého vzorku sice docházelo k mírnému poklesu koncentrace manganu a zejména chromu, avšak jejich vliv na eutektickou teplotu a teplotu likvidu lze v rozmezí změny jejich koncentrací považovat pro daný účel za zanedbatelný.

V *tab. 10* jsou uvedeny teploty likvidu a eutektické teploty naměřené při tomto experimentu.

**Tab. 10** – Teploty likvidu a eutektické teploty naměřené při experimentálním stanovení vlivu uhlíku

Vzorek	T <sub>lik.</sub> [°C]	T <sub>eut.</sub> [°C]
1.2	1217	1197
2.2	1272	1186
3.2	1304	1180
4.2	1338	-

Výsledky potvrdily předpoklad, že s rostoucím obsahem uhlíku nastává výrazný pokles teploty likvidu a naopak mírný vzestup eutektické teploty. Jak je v *tab. 10* vidět, u vzorku 4.2 nebyla stanovena eutektická teplota, neboť obsah uhlíku u tohoto vzorku byl již mimo oblast eutektického tuhnutí litiny. Hodnoty teplot likvidu a eutektických teplot byly následně zpracovány do grafu, jenž je uveden na *obr. 34*.



**Obr. 34** – Grafické znázornění vlivu obsahu uhlíku na teplotu likvidu a eutektickou teplotu

Závislost teploty likvidu na obsahu uhlíku z grafu na předchozím obrázku lze vyjádřit rovnicí:

$$T_{lik.} = 1489,1 - 87 \cdot [\%C] \quad (18)$$

Z té je pak patrné, že uhlík v intervalu 1,73 až 3,12 % u ANL s obsahem niklu 19,8 až 20,3 % a křemíku 1,50 až 1,60 % snižuje teplotu likvidu podobně jako u ocelí, a to o 87°C na 1 % C.

Podobně lze rovnicí vyjádřit i vliv uhlíku na eutektickou teplotu, a to:

$$T_{eut.} = 1143 + 17,25 \cdot [\%C] \quad (19)$$

Z této rovnice plyne, že ve výše uvedeném intervalu chemického složení uhlík zvyšuje eutektickou teplotu o 17,25°C na 1 % C.

V případě eutektické koncentrace uhlíku platí, že  $T_{lik.} = T_{eut.}$ . Za této podmínky lze z rovnic (18) a (19) vypočítat, že pro uvedené chemické složení ANL se eutektická koncentrace uhlíku rovná přibližně 3,32 %. V takovém případě pak lze z rovnic (18) a (19) určit, že  $T_{lik.} = T_{eut.} \approx 1200^\circ\text{C}$ .

### 5.1.2 Experimentální stanovení vlivu Ni na teplotu likvidu a eutektickou teplotu

Nikl je hlavním legujícím prvkem v ANL. Jeho obsah je tedy dosti vysoký a může mít značný vliv na teplotu likvidu i na eutektickou teplotu.

U tohoto experimentu byl rozsah koncentrací niklu 16 až 31,5 % (opět pro čtyři odlitky). Toto rozmezí pokrývá převážnou většinu prakticky vyráběných značek ANL. Obsah ostatních prvků, zejména uhlíku a křemíku je udržován konstantní. Obsah uhlíku byl přibližně 2,3 % a křemíku

1,6 %, což odpovídá obsahu těchto prvků ve velké části normovaných ANL. Konkrétní chemické složení jednotlivých odlitých vzorků je uvedeno v *tab. 11*.

**Tab. 11** – Chemické složení vzorků z tavby pro stanovení vlivu niklu

č. vzorku	%C	%Ni	%Si	%Mn	%Cr	%P	%S	%Mg
<b>1.II</b>	2,35	16,0	1,50	0,60	1,80	0,032	0,007	0,045
<b>2.II</b>	2,34	20,5	1,50	0,60	1,70	0,030	0,007	0,055
<b>3.II</b>	2,35	26,5	1,55	0,58	1,60	0,028	0,006	0,050
<b>4.II</b>	2,30	31,5	1,60	0,50	1,45	0,025	0,006	0,050
<b>průměr</b>	2,34	-	1,54	0,57	-	0,029	0,007	0,050
<b>směrodatná odchylka</b>	0,02	-	0,04	0,04	-	0,003	0,001	0,004

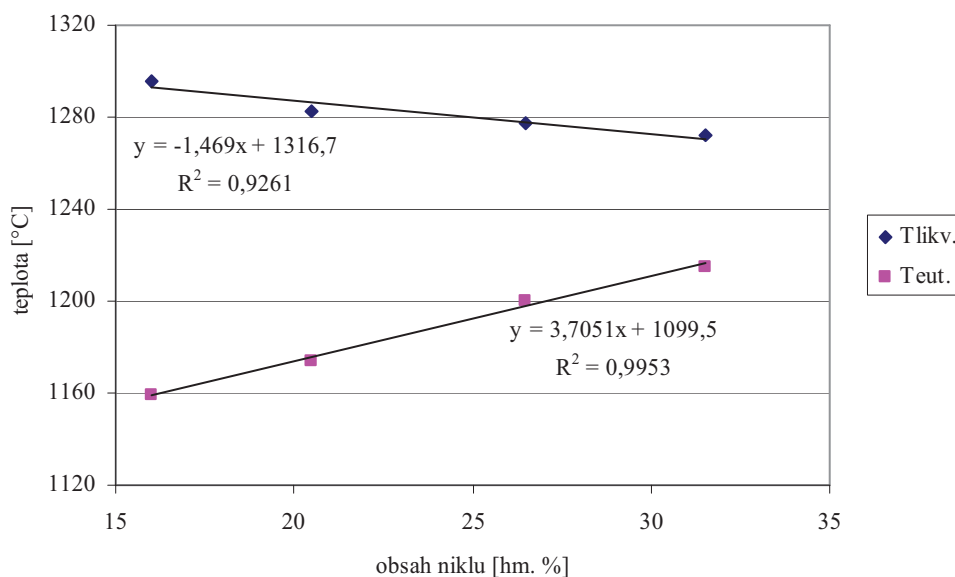
Jako první byl odlit vzorek 1.II s obsahem niklu 16 %, pak následovalo nauhličení a dolegování niklu a křemíku na původní koncentraci a odlití dalšího vzorku. Během postupného dolegování po odlití každého vzorku sice docházelo k mírnému poklesu koncentrace chromu, avšak jeho vliv na eutektickou teplotu a teplotu likvidu lze v rozmezí změny jeho koncentrace považovat za zanedbatelný.

V *tab. 12* jsou uvedeny teploty likvidu a eutektické teploty naměřené při tomto experimentu. I zde byl potvrzen předpoklad, že s rostoucím obsahem niklu dochází k poklesu teploty likvidu a ke zvyšování eutektické teploty.

**Tab. 12** - Teploty likvidu a eutektické teploty naměřené při experimentálním stanovení vlivu niklu

Vzorek	T <sub>lik.</sub> [°C]	T <sub>eut.</sub> [°C]
<b>1.II</b>	1296	1159
<b>2.II</b>	1283	1174
<b>3.II</b>	1277	1200
<b>4.II</b>	1272	1215

Naměřené teploty byly zpracovány do grafu na *obr. 35*, jenž názorně ukazuje vliv koncentrace niklu na teplotu likvidu a eutektickou teplotu.



**Obr. 35** – Grafické znázornění vlivu obsahu niklu na teplotu likvidu a eutektickou teplotu

Vliv niklu na teplotu likvidu pak lze vyjádřit rovnicí:

$$T_{lik.} = 1316,7 - 1,47 \cdot [\%Ni] \quad (20)$$

Z této rovnice pak plyne, že u ANL s obsahem uhlíku 2,30 až 2,35 %, křemíku 1,50 až 1,60 % a obsahem niklu v rozmezí 16,0 až 31,5 % snižuje nikl teplotu likvidu o 1,47°C na každé procento niklu.

Obdobným způsobem lze vyjádřit i vliv niklu na eutektickou teplotu, a to rovnicí:

$$T_{eut.} = 1099,5 + 3,71 \cdot [\%Ni] \quad (21)$$

Z této rovnice je patrné, že ve výše uvedeném intervalu chemického složení zvyšuje každé procento niklu eutektickou teplotu o 3,71°C. Literatura [7] uvádí, že 1 % niklu zvyšuje eutektickou teplotu o 3,7°C, což velmi přesně odpovídá i výsledkům tohoto experimentu.

Stejně jako u předchozího experimentu při stanovování vlivu uhlíku lze i zde napsat, že v eutektickém bodě se  $T_{lik.} = T_{eut.}$ . Potom lze z rovnic (20) a (21) vypočítat, že eutektická koncentrace niklu se pro uvedené chemické složení ANL rovná přibližně 41,9 %. V takovém případě lze z rovnic (20) a (21) dále vypočítat, že  $T_{lik.} = T_{eut.} \approx 1255^{\circ}\text{C}$ .

### 5.1.3 Experimentální stanovení vlivu Si na teplotu likvidu a eutektickou teplotu

Ani vliv křemíku na eutektickou teplotu a teplotu likvidu není zcela zanedbatelný.

V tomto případě bylo pro experiment zvoleno rozmezí koncentrací křemíku 0,9 až 5,5 % (pro pět odlitků). Toto rozpětí pokrývá všechny normované značky ANL. Obsah ostatních prvků, zejména niklu a uhlíku je udržován konstantní. Obsah niklu je zvolen 20 % a uhlíku 2,6 %, což odpovídá obsahu těchto prvků u nejčastěji vyráběné značky D-2. Konkrétní chemické složení jednotlivých odlitých vzorků je uvedeno v tab. 13.

**Tab. 13** - Chemické složení vzorků z tavby pro stanovení vlivu křemíku

č. vzorku	%C	%Ni	%Si	%Mn	%Cr	%P	%S	%Mg
<b>1B</b>	2,54	19,5	0,90	0,35	0,74	0,020	0,007	0,023
<b>2B</b>	2,46	20,0	2,20	0,35	0,73	0,020	0,005	0,046
<b>3B</b>	2,45	20,0	3,50	0,35	0,7	0,020	0,005	0,068
<b>4B</b>	2,43	20,0	4,30	0,35	0,68	0,020	0,005	0,070
<b>5B</b>	2,39	20,0	5,50	0,35	0,67	0,020	0,004	0,050
<b>průměr</b>	2,45	19,90	-	0,35	0,70	0,020	0,005	0,051
<b>směrodatná odchylka</b>	0,05	0,20	-	0,00	0,03	0,000	0,001	0,017

Jako první byl odlit vzorek 1B s obsahem křemíku 0,9 %, pak následovalo nauhličení, dolegování niklu na původní koncentraci a zvýšení obsahu křemíku na hodnotu odpovídající následujícímu vzorku dle *tab. 13* a následně odlití tohoto vzorku.

V *tab. 14* jsou pak uvedeny teploty likvidu a eutektické teploty naměřené při tomto experimentu.

**Tab. 14** - Teploty likvidu a eutektické teploty naměřené při experimentálním stanovení vlivu křemíku

Vzorek	T <sub>lik.</sub> [°C]	T <sub>eut.</sub> [°C]
<b>1B</b>	1290	1193
<b>2B</b>	1253	1197
<b>3B</b>	1210	1192
<b>4B</b>	1233	1184
<b>5B</b>	1344	1172

Naměřené teploty byly zpracovány do grafu na *obr. 36*, jenž názorně ukazuje vliv koncentrace křemíku na teplotu likvidu a eutektickou teplotu. Opět byl potvrzen předpoklad, že s rostoucím obsahem křemíku dochází k poklesu teploty likvidu. Jak je však z *obr. 36* vidět, došlo od vzorku 3B dále k překročení eutektického bodu čímž začala teplota likvidu s rostoucí koncentrací křemíku opět stoupat. Proto byla závislost teploty likvidu na obsahu křemíku rozdělena na dvě části. První část zahrnuje vzorky 1B, 2B a 3B a jedná se o podeutektické slitiny. Druhá část, nadeutektické slitiny, je pak tvořena hodnotami naměřenými u vzorků 3B, 4B a 5B.

Vliv koncentrace křemíku na teplotu likvidu v podeutektické oblasti pak lze vyjádřit rovnicí:

$$T_{lik.} = 1318,2 - 31,15 \cdot [\%Si] \quad (22)$$

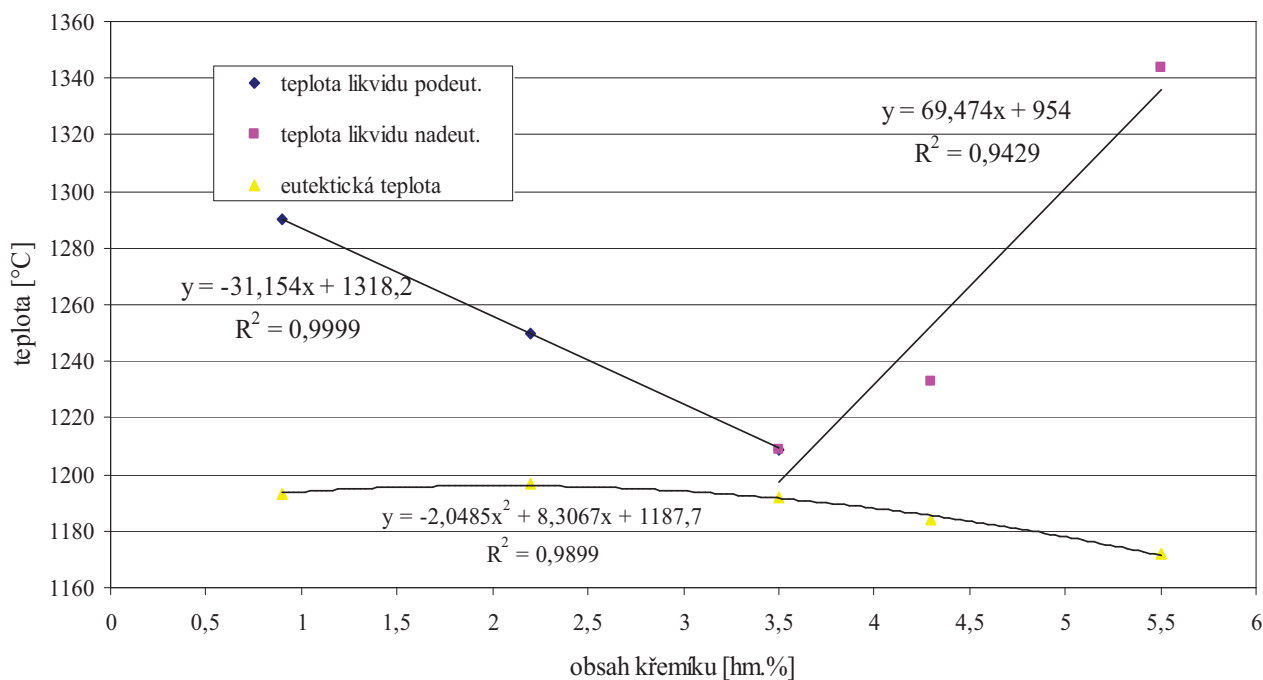
Z této rovnice je patrné, že u ANL s obsahem uhlíku 2,45 až 2,54 %, niklu 19,5 až 20,0 % a koncentrací křemíku v rozmezí 0,9 až 3,5 % snižuje křemík teplotu likvidu o 31,15°C na každé procento křemíku.

V nadeutektické oblasti pak lze působení křemíku vyjádřit rovnicí:

$$T_{lik.} = 954,0 + 69,47 \cdot [\%Si] \quad (23)$$

Zde je vidět, že u ANL s obsahem uhlíku 2,39 až 2,45 %, niklu 20,0 % a koncentrací křemíku v rozmezí 3,5 až 5,5 % zvyšuje křemík teplotu likvidu o 69,47°C na každé procento křemíku.





**Obr. 36** – Grafické znázornění vlivu obsahu křemíku na teplotu likvidu a eutektickou teplotu

Vliv křemíku na eutektickou teplotu lze popsat následujícím polynomem druhého stupně:

$$T_{eut.} = 1187,7 + 8,31 \cdot [\%Si] - 2,05 \cdot [\%Si]^2 \quad (24)$$

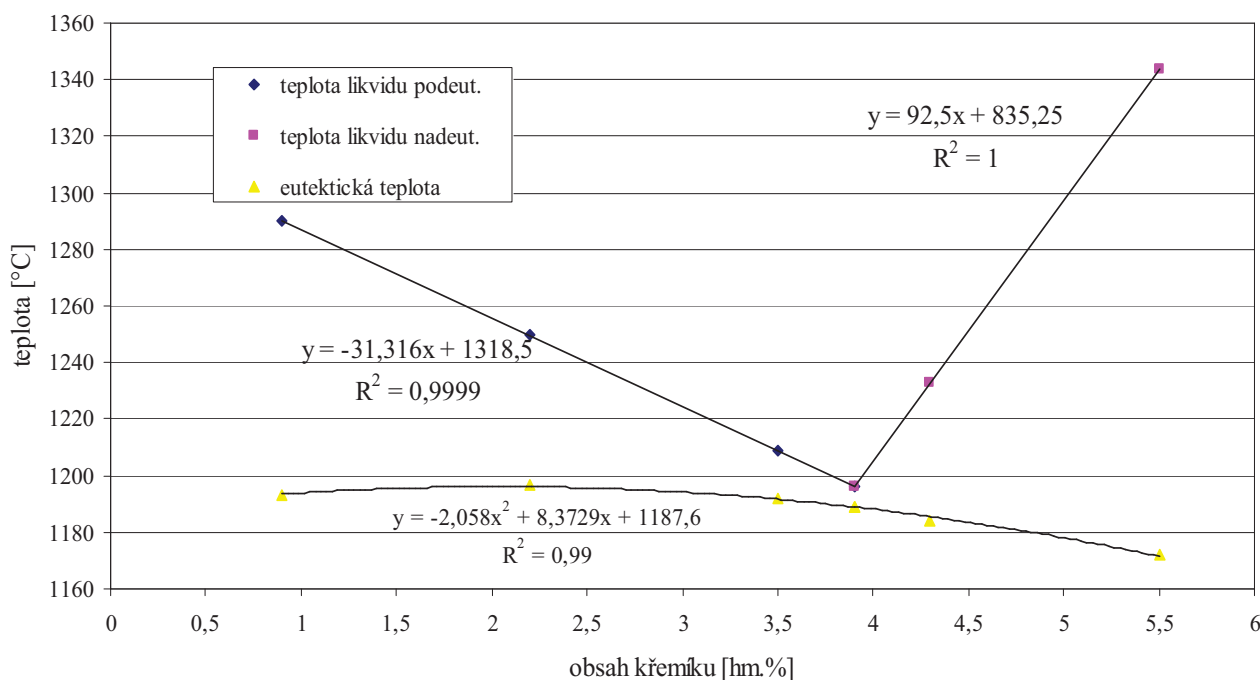
Z této rovnice je patrné, že u ANL s obsahem uhlíku kolem 2,45 %, niklu asi 20 % a koncentrací křemíku v rozmezí 0,9 až 5,5 % eutektická teplota s rostoucí koncentrací křemíku zpočátku mírně roste a po dosažení lokálního maxima při obsahu křemíku 2,03 % a eutektické teplotě 1196,1°C o něco výrazněji klesá dolů, až na eutektickou teplotu 1172°C při obsahu 5,5 % křemíku. Od lokálního maxima činí pokles eutektické teploty přibližně 7,7°C na každé procento křemíku.

Ovšem výše uvedený postup sestrojení podeutektické a nadeutektické přímky likvidu tím způsobem, že se teplota likvidu naměřená pro vzorek 3B vezme jako společná, není zcela ideální. Takový postup v podstatě předpokládá, že tento společný bod je eutektický bod a tedy že složení vzorku 3B je eutektické, což ovšem není pravda. Chemické složení tohoto vzorku se sice eutektickému přibližuje, nicméně je stále mírně podeutektické. Eutektický bod lze ovšem odhadnout pomocí inverzního modelování řešením soustavy rovnic dvou přímek. První přímka se získá proložením bodů získaných vynesáním hodnot naměřených u vzorků 1B, 2B a 3B, což je rovnice (22). Druhá přímka je získána vynesáním hodnot naměřených u vzorků 4B a 5B. Přímka vzniklá proložením těmito dvěma body pak má rovnici:

$$T_{lik.} = 835,25 + 92,5 \cdot [\%Si] \quad (25)$$

Takto vypočtený bod je průsečíkem těchto dvou přímek a jeho souřadnice jsou 3,9 % křemíku na ose x a 1196°C na ose y. Dosažením vypočtené koncentrace 3,9 % křemíku do rovnice (24) pak byl získán bod o souřadnicích 3,9 % křemíku na ose x a 1189°C na ose y. Tento bod leží na křivce popisující průběh eutektické teploty se změnou koncentrace křemíku. Na obr. 37 je

znázorněn graf vzniklý vynesemím těchto dvou vypočtených bodů spolu s body získanými měřením.



**Obr. 37** – Vliv křemíku na teplotu likvidu a eutektickou teplotu při použití bodů získaných inverzním modelováním

Z tohoto upraveného grafu je pak vidět, že rovnice popisující vliv křemíku na teplotu likvidu v podeutektické oblasti se nepatrně změnila a nyní má tvar:

$$T_{lik.} = 1318,5 - 31,32 \cdot [\%Si] \quad (26)$$

Dle této rovnice tedy u ANL s obsahem uhlíku 2,45 až 2,54 %, niklu 19,5 až 20,0 % a koncentrací křemíku v rozmezí 0,9 až 3,9 % snižuje křemík teplotu likvidu o 31,32°C na každé procento křemíku.

V nadeutektické oblasti se již působení křemíku na teplotu likvidu změnilo výrazněji a je vyjádřeno rovnicí (25). Zde je vidět, že v nadeutektické oblasti u ANL s obsahem uhlíku 2,39 až 2,45 %, niklu 20,0 % a koncentrací křemíku v rozmezí 3,9 až 5,5 % zvyšuje křemík teplotu likvidu o 92,5°C na každé procento křemíku.

Vliv křemíku na eutektickou teplotu se změnil jen velmi nepatrně a je popsán rovnicí:

$$T_{eut.} = 1187,6 + 8,37 \cdot [\%Si] - 2,06 \cdot [\%Si]^2 \quad (27)$$

Jak však již bylo řečeno, tato rovnice se od rovnice (24) liší jen velmi nepatrně, tudíž závěry z ní vyvozené jsou stejné jako u rovnice (24), tedy že u ANL s obsahem uhlíku kolem 2,45 %, niklu asi 20 % a koncentrací křemíku v rozmezí 0,9 až 5,5 % eutektická teplota s rostoucí koncentrací křemíku zpočátku mírně roste a po dosažení lokálního maxima při obsahu křemíku 2,03 % a eutektické teplotě 1196,1°C o něco výrazněji klesá dolů, až na eutektickou teplotu 1172°C při

obsahu 5,5 % křemíku. Od lokálního maxima činí pokles eutektické teploty přibližně 7,7°C na každé procento křemíku.

## 5.2 STANOVENÍ SPOLEČNÉHO Vlivu C, Si A Ni NA TEPLITU LIKVIDU A EUTEKTICKOU TEPLITU

Jak již bylo uvedeno výše, teplotu likvidu a eutektickou teplotu ve skutečnosti neovlivňuje každý prvek samostatně, ale jejich působení je komplexní. Dochází ke změnám aktivit ostatních prvků v litině a tím i ke změnám v teplotě likvidu a eutektické teplotě. Pro postihnutí vlivu všech prvků současně byl zvolen statistický přístup pomocí regresní analýzy. Byla použita data získaná při výše popsaných experimentech provedených za účelem zjištění vlivu uhlíku, niklu a křemíku na teplotu likvidu a eutektickou teplotu. Souhrn těchto dat je uveden v *tab. 15*.

**Tab. 15** – Data použitá pro regresní analýzu

Tavba/vzorek	%C	%Si	%Cr	%Ni	T <sub>lik.</sub> [°C]	T <sub>eut.</sub> [°C]
6/1.2	3,12	1,50	1,70	20,2	1217	1197
6/2.2	2,51	1,60	1,50	20,3	1272	1186
6/3.2	2,13	1,55	1,30	20,0	1304	1180
6/4.2	1,73	1,50	1,10	19,8	1338	-
7/1.II	2,35	1,50	1,80	16,0	1296	1159
7/2.II	2,34	1,50	1,70	20,5	1283	1174
7/3.II	2,35	1,55	1,60	26,5	1277	1200
7/4.II	2,30	1,60	1,45	31,5	1272	1215
12/1B	2,54	0,90	0,74	19,5	1290	1193
12/2B	2,46	2,20	0,73	20,0	1250	1197
12/3B	2,45	3,50	0,70	20,0	1209	1192
12/4B	2,43	4,30	0,68	20,0	1233	1184
12/5B	2,39	5,50	0,67	20,0	1344	1172

Na základě těchto dat byla regresní analýzou ve statistickém softwaru Statgraphics stanovena následující rovnice pro výpočet eutektické teploty:

$$T_{eut.} = 1087,49 + 26,0334 \cdot \%C - 4,85029 \cdot \%Si - 18,8772 \cdot \%Cr + 3,30861 \cdot \%Ni \quad (28)$$

Rozmezí koncentrací jednotlivých legujících prvků vymezující platnost této rovnice jsou uvedena v *tab. 16*. Koeficient determinace pro rovnici (28) je  $R^2 = 94,95 \%$ . Vypočtené hodnoty  $T_{eut.}$  leží s 95 %-ní pravděpodobností v intervalu  $T_{eut.} \pm 8,4^\circ\text{C}$ .

**Tab. 16** – Intervaly platnosti výpočtu eutektické teploty a teploty likvidu

%C	%Si	%Cr	%Ni
1,73 – 3,12	0,90 – 4,3	0,67 – 1,8	16,0 – 31,5

Dále byla také stanovena rovnice pro výpočet teploty likvidu:

$$T_{lik.} = 1546,55 - 85,8724 \cdot \%C - 18,2599 \cdot \%Si - 1,54457 \cdot \%Ni \quad (29)$$

Rozmezí koncentrací jednotlivých legujících prvků vymezující platnost této rovnice jsou opět uvedena v *tab. 16*. Koeficient determinace pro rovnici (29) je  $R^2 = 97,65 \%$ . Vypočtené hodnoty  $T_{lik.}$  leží s 95 %-ní pravděpodobností v intervalu  $T_{lik.} \pm 12,2^\circ\text{C}$ . V *tab. 17* jsou pak pro porovnání uvedeny teploty likvidu a eutektické teploty naměřené u vzorků z taveb 6, 7 a 12 spolu s teplotami vypočtenými na základě vztahů (28) a (29).

**Tab. 17** – Porovnání teplot naměřených a vypočtených dle vzorců (28) a (29)

Tavba/vzorek	naměřeno		výpočet		rozdíl výp. – nam.	rozdíl výp. – nam.
	$T_{lik.} [^\circ\text{C}]$	$T_{eut.} [^\circ\text{C}]$	$T_{lik.} [^\circ\text{C}]$ dle (29)	$T_{eut.} [^\circ\text{C}]$ dle (28)	$T_{lik.} [^\circ\text{C}]$	$T_{eut.} [^\circ\text{C}]$
6/1.2	1217	1197	1220,0	1196,2	3,0	-0,8
6/2.2	1272	1186	1270,4	1183,9	-1,6	-2,1
6/3.2	1304	1180	1304,4	1177,1	0,4	-2,9
6/4.2	1338	-	1340,0	1170,0	2,0	-
7/1.II	1296	1159	1292,6	1160,4	-3,4	1,4
7/2.II	1283	1174	1286,6	1176,9	3,6	2,9
7/3.II	1277	1200	1275,5	1198,6	-1,5	-1,4
7/4.II	1272	1215	1271,2	1216,5	-0,8	1,5
12/1B	1290	1193	1281,9	1199,8	-8,1	6,8
12/2B	1253	1197	1264,2	1193,3	11,2	-3,7
12/3B	1210	1192	1241,4	1187,3	31,4	-4,7
12/4B	1233	1184	1228,5	1183,2	-4,5	-0,8
12/5B	1344	1172	1210,0	1176,6	-134,0	4,6
max.:					31,4	6,8
min.:					(-134,0) -8,1	-4,7
průměr:					(-7,562) 2,975	0,067

V posledních dvou sloupcích této tabulky jsou pro větší názornost uvedeny rozdíly mezi vypočtenými a naměřenými teplotami. Kladná hodnota v těchto sloupcích značí, že vypočtená hodnota je větší než hodnota skutečná. Analogicky u záporného čísla je tomu naopak. Jak je vidět z posledního sloupce, tak v případě eutektické teploty nejsou rozdíly mezi skutečnými a vypočtenými teplotami nijak velké. Průměrná hodnota odchylky pro vypočtenou a naměřenou teplotu činí pouze  $0,067^\circ\text{C}$ . Největší kladná odchylka je  $6,8^\circ\text{C}$ , což znamená, že vypočtená eutektická teplota byla nejvýše o  $6,8^\circ\text{C}$  větší než teplota skutečně naměřená. Největší záporná odchylka pak byla  $-4,7^\circ\text{C}$ , z čehož plyne, že vypočtená eutektická teplota byla maximálně o  $4,7^\circ\text{C}$  menší než teplota skutečně naměřená. V případě teploty likvidu je vidět, že rozdíly mezi vypočtenými a naměřenými teplotami jsou již poněkud větší. Maximální kladná odchylka je  $31,4^\circ\text{C}$ . U největší záporné odchylky je sice u vzorku 12/5B uvedena hodnota  $-134,0^\circ\text{C}$ , tedy že vypočtená hodnota je o  $134^\circ\text{C}$  menší než hodnota skutečná. Ovšem vzorek 12/5B obsahuje vysokou koncentraci křemíku (5,5 %) a jeho složení je poměrně značně nadeutektické, proto je jeho teplota likvidu dosti vysoká. Z tohoto důvodu není vhodné odchylku  $-134,0^\circ\text{C}$  brát v úvahu. Po vyloučení vzorku 12/5B ze základního souboru je tedy největší záporná odchylka již pouze  $-8,1^\circ\text{C}$ , což tedy znamená, že vypočtená teplota likvidu byla nejvýše o  $8,1^\circ\text{C}$  menší než teplota skutečně naměřená. Průměrná hodnota odchylky vypočtené a naměřené teploty je pak  $2,975^\circ\text{C}$ . Takové odchylky jsou již akceptovatelné, a proto byly později rovnice (28) a (29) pro

výpočet eutektické teploty resp. teploty likvidu implementovány do programu s názvem *Výpočet licích teplot litin Ni-resist*, který umožňuje stanovení základních metalurgicko-technologických parametrů ANL (viz. kapitola 5.5).

### 5.3 STANOVENÍ Vlivu C, Ni A Si NA TEPLITU LIKVIDU A EUTEKTICKOU TEPLITU POMOCÍ STATISTICKÉHO PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTU

Následující kapitola je věnována stanovení teploty likvidu a eutektické teploty pro různá chemická složení ANL, a to pomocí statistického plánu experimentu. V případě dobře zvolených podmínek experimentů je možné pomocí statistických metod určit nejen vliv jednotlivých zvolených prvků na teplotu likvidu a eutektickou teplotu, ale i vliv všech vzájemných kombinací těchto prvků, tzv. interakce. Vzhledem k tomu, že pro stanovení vlivu všech teoreticky možných legujících prvků by bylo potřeba velké množství experimentů, byly zvoleny jen tři nejdůležitější prvky a to nikl, uhlík a křemík. U každého tohoto prvku pak byla zvolena hodnota minimální a maximální koncentrace, a to podle toho v jakém koncentračním rozmezí nás vliv vybraných prvků nejvíce zajímá, tedy podle toho v jakém rozmezí se obsah daného prvku pohybuje v nejčastěji vyráběných ANL. Tato koncentrační rozmezí jsou uvedena v *tab. 18*. Koncentrace dalších dvou prvků, které jsou v ANL téměř vždy přítomny, tedy chromu a manganu, byla udržována na konstantních hodnotách, a to přibližně 0,4 % u obou.

**Tab. 18** – Koncentrační rozmezí vybraných prvků

prvek	koncentrace [hm. %]	
	min.	max.
Ni	18,5	34,0
C	1,6	2,7
Si	2,2	5,5

Vzájemnou kombinací minimálních a maximálních koncentrací u všech tří vybraných prvků vznikl statistický plán experimentu s osmi různými chemickými složeními vzorků. Z důvodu přesnějších výsledků statistické analýzy bylo třeba každý bod statistického plánu, tedy každé chemické složení vzorku, odlít dvakrát. Tímto vznikl plný třífaktorový ortogonální plán experimentu s opakováním, kde počet opakování  $n = 2$ . Dle tohoto plánu bylo tedy třeba odlít celkem šestnáct vzorků, tzn. uskutečnit osm taveb. Tyto vzorky jsou označeny písmeny A až P a jejich chemické složení podle statistického plánu experimentu je uvedeno v *tab. 19*.

**Tab. 19** – Chemické složení vzorků dle statistického plánu

vzorek	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
%C	1,6	1,6	2,7	2,7	2,7	2,7	1,6	1,6	1,6	1,6	2,7	2,7	2,7	2,7	1,6	1,6
%Si	2,2	2,2	2,2	2,2	5,5	5,5	2,2	2,2	5,5	5,5	5,5	5,5	2,2	2,2	5,5	5,5
%Ni	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	34	34	34	34	34	34	34	34	18,5	18,5

Aby bylo zabráněno zkreslení výsledků, bylo opakování prováděno tak, že se z pece odlila část kovu do lící pánve, kde proběhlo očkování a modifikace, poté následovalo lití. Po odlití zkušebního odlitku se zbytek kovu vrátil zpět do pece. Následovalo krátké zapnutí pece z důvodu chemické a teplotní homogenizace a teprve poté byla z pece odebrána další část kovu



pro opakované odlití zkušebního odlitku se stejným chemickým složením u které opět proběhlo v lici pánvi očkování a modifikace. V *tab. 20* je uvedeno konkrétní dosažené chemické složení každého vzorku a tomu odpovídající naměřené teploty likvidu a eutektické teploty.

**Tab. 20** – Chemické složení a naměřené teploty u vzorků pro statistický plán experimentu

vzorek	%C	%Si	%Ni	%Mn	%Cr	T <sub>lik.</sub> [°C]	T <sub>eut.</sub> [°C]
A	1,54	2,2	18,0	0,40	0,40	1350	1181
B	1,54	2,2	18,0	0,40	0,40	1348	1183
C	2,74	2,2	18,8	0,40	0,40	1236	1206
D	2,73	2,2	18,9	0,40	0,40	1235	1203
E	2,55	4,9	18,9	0,40	0,37	1337	1196
F	2,55	5,0	18,8	0,36	0,38	1345	1183
G	1,51	2,4	32,5	0,45	0,40	1319	1217
H	1,49	2,5	33,0	0,45	0,40	1321	1220
I	1,70	5,3	33,0	0,50	0,40	1215	1196
J	1,56	5,5	33,0	0,50	0,40	1220	1202
K	2,26	5,3	35,0	0,50	0,40	1377	1219
L	2,13	5,3	35,0	0,50	0,40	1346	1222
M	2,48	2,7	31,3	0,38	0,38	1338	1232
N	2,49	2,8	31,4	0,38	0,36	1337	1232
O	1,55	5,7	19,0	0,70	0,45	1237	1153
P	1,50	6,0	19,3	0,70	0,45	1247	1164

Je vidět, že skutečně dosažené chemické složení se poněkud liší od složení požadovaného dle statistického plánu experimentu. To se samozřejmě dalo očekávat, protože dosažení naprosto přesně předepsaného chemického složení a navíc opakovaně je v praxi téměř nemožné. Přitom co nejpřesnější dodržení předem stanovených koncentračních rozmezí je jednou z důležitých podmínek použití statisticky plánovaného experimentu. Minimální a maximální koncentrace prvků jsou totiž při plánovaném experimentu vstupní faktory, které jsou pevně stanoveny a nemění se. Naproti tomu experimentálně zjištěné teploty likvidu a eutektické teploty jsou sledované veličiny, které jsou přímou odezvou na různé kombinace vstupních faktorů. Pokud by se však během měření měnily i vstupní faktory, tedy minimální a maximální koncentrace uhlíku, křemíku a niklu, vedlo by to ke značným chybám a nemožnosti použití metod statistického plánování experimentu. Z tohoto důvodu byly následně upraveny požadované minimální a maximální koncentrace uhlíku, křemíku a niklu uvedené v *tab. 18*. Tato nová koncentrační rozmezí byla získána tak, že skutečně dosažená chemická složení byla zprůměrována a jako nové minimální a maximální požadované koncentrace byly dosazeny tyto aritmetické průměry. Takto nově získaná koncentrační rozmezí jsou uvedena v *tab. 21*.

**Tab. 21** – Nově stanovená koncentrační rozmezí uhlíku, křemíku a niklu

prvek	koncentrace [hm. %]	
	min.	max.
C	1,55	2,49
Si	2,4	5,4
Ni	18,7	33,0

Takto upravené hodnoty vstupních faktorů, tedy koncentračních rozmezí, samozřejmě nemají žádný vliv na obsahy prvků dosažené při experimentu, ale se skutečnými obsahy se také při zpracovávání dat plánovaného experimentu nepočítá. Výpočet je založen pouze na předem stanovených hodnotách minimálních a maximálních koncentrací požadovaných prvků, resp. na jejich vzájemných kombinacích a na tomu odpovídajících naměřených teplotách likvidu a eutektických teplotách. Pokud jsou tedy do výpočtu použity hodnoty nově stanovených koncentračních rozmezí, nezamezí se sice vzniku určitých chyb, ale tyto chyby jsou podstatně menší, než by tomu bylo v případě užití původních hodnot podle *tab. 18*.

K vyhodnocení plánovaného experimentu, tedy k výpočtu vlivu uhlíku, křemíku a niklu na teplotu likvidu a eutektickou teplotu, byl použit program Minitab 14. Do tohoto programu byly zadány vzájemné kombinace minimálních a maximálních koncentrací těchto tří prvků podle *tab. 19*, ale s použitím nových hodnot dle *tab. 21*. Dále byly zadány experimentálně zjištěné teploty likvidu a eutektické teploty odpovídající těmto kombinacím koncentrací. Na základě těchto vložených dat program Minitab vypočítal následující rovnice pro stanovení teploty likvidu a eutektické teploty:

$$T_{lik.} = 2375,53 - 579,55 \cdot \%C - 216,242 \cdot \%Si - 25,3187 \cdot \%Ni + 115,235 \cdot \%C \cdot \%Si + 14,8639 \cdot \%C \cdot \%Ni + 3,41045 \cdot \%Si \cdot \%Ni - 2,13262 \cdot \%C \cdot \%Si \cdot \%Ni \quad (30)$$

$$T_{eut.} = 1114,37 + 23,5372 \cdot \%C - 5,79167 \cdot \%Si + 2,36888 \cdot \%Ni \quad (31)$$

Obě rovnice platí v intervalu koncentrací uhlíku, křemíku a niklu daném *tab. 21*. Rovnice (30) slouží pro výpočet teploty likvidu ANL s libovolnou koncentrací uhlíku, křemíku a niklu z uvedeného intervalu platnosti. Koeficient determinace pro rovnici (30) je  $R^2 = 95,22 \%$ . Vypočtené hodnoty  $T_{lik.}$  leží s 95 %-ní pravděpodobností v intervalu  $T_{lik.} \pm 17,0^\circ\text{C}$ . Obdobně rovnice (31) umožňuje za stejných podmínek vypočíst eutektickou teplotu s koeficientem determinace  $R^2 = 92,40 \%$ . Vypočtené hodnoty  $T_{eut.}$  leží s 95 %-ní pravděpodobností v intervalu  $T_{eut.} \pm 10,7^\circ\text{C}$ . V *tab. 22* jsou pro porovnání uvedeny teploty ve skutečnosti naměřené u vzorků A až P spolu s teplotami vypočtenými podle vzorců (30) a (31).

**Tab. 22** – Porovnání teplot naměřených a vypočtených dle vzorců (30) a (31)

vzorek	naměřeno		výpočet		výp.- nam.	výp.- nam.
	$T_{lik.} [^\circ\text{C}]$	$T_{eut.} [^\circ\text{C}]$	$T_{lik.} [^\circ\text{C}]$ dle (30)	$T_{eut.} [^\circ\text{C}]$ dle (31)	$T_{lik.} [^\circ\text{C}]$	$T_{eut.} [^\circ\text{C}]$
<b>A</b>	1350	1181	1359,0	1180,5	9,0	-0,5
<b>B</b>	1348	1183	1359,0	1180,5	11,0	-2,5
<b>C</b>	1236	1206	1195,5	1210,7	-40,5	4,7
<b>D</b>	1235	1203	1197,9	1210,7	-37,1	7,7
<b>E</b>	1337	1196	1328,0	1190,8	-9,0	-5,2
<b>F</b>	1345	1183	1331,7	1190,0	-13,3	7,0
<b>G</b>	1319	1217	1320,5	1213,0	1,5	-4,0
<b>H</b>	1321	1220	1315,2	1213,1	-5,8	-6,9
<b>I</b>	1215	1196	1243,2	1201,9	28,2	5,9
<b>J</b>	1220	1202	1215,7	1197,4	-4,3	-4,6
<b>K</b>	1377	1219	1328,1	1219,8	-48,9	0,8

**pokračování Tab. 22** – Porovnání teplot naměřených a vypočtených dle vzorců (30) a (31)

vzorek	naměřeno		výpočet		výp.- nam.	výp.- nam.
	T <sub>lik.</sub> [°C]	T <sub>eut.</sub> [°C]	T <sub>lik.</sub> [°C] dle (30)	T <sub>eut.</sub> [°C] dle (31)	T <sub>lik.</sub> [°C]	T <sub>eut.</sub> [°C]
<b>L</b>	1346	1222	1307,9	1216,7	-38,1	-5,3
<b>M</b>	1338	1232	1328,6	1231,3	-9,4	-0,7
<b>N</b>	1337	1232	1330,5	1231,1	-6,5	-0,9
<b>O</b>	1237	1153	1230,8	1162,8	-6,2	9,8
<b>P</b>	1247	1164	1212,0	1160,6	-35,0	-3,4
				max.:	28,2	9,8
				min.:	-48,9	-6,9
				průměr:	-12,78	0,12

V posledních dvou sloupcích *tab. 22* je pro názornost uveden rozdíl vypočtených a naměřených teplot. Kladná hodnota v těchto sloupcích tedy znamená, že vypočtené hodnoty jsou větší než skutečně naměřené, v případě záporných čísel je tomu naopak. V posledních třech řádcích jsou pak uvedeny maximální a minimální hodnoty v rozdílech vypočtených a naměřených teplot a také průměrná hodnota tohoto rozdílu. Jak je vidět, tak v případě teploty likvidu byla vypočtená hodnota větší než skutečně naměřená maximálně o 28,2°C a menší byla nejvíce o 48,9°C. Vypočtená hodnota teploty likvidu byla v průměru o 12,78°C menší než hodnota naměřená. V případě eutektické teploty byla vypočtená hodnota větší než skutečná maximálně o 9,8°C a menší byla nejvíce o 6,9°C. Průměrná odchylka vypočtené eutektické teploty od skutečně naměřené je 0,12°C.

## 5.4 STANOVENÍ UHLÍKOVÉHO EKVIVALENTU A EUTEKTICKÉ KONCENTRACE UHLÍKU

Uhlíkový ekvivalent slouží k souhrnnému vyjádření vlivu doprovodných a legujících prvků na aktivitu uhlíku. Podle hodnoty vypočteného uhlíkového ekvivalentu lze usuzovat, je-li složení litiny nad- či podeutektické příp. eutektické a dále odhadovat chování tohoto materiálu podle toho jak daleko leží vypočtená hodnota uhlíkového ekvivalentu od eutektického bodu 4,25. Eutektická koncentrace uhlíku také zohledňuje vliv prvků obsažených v litině na aktivitu uhlíku, ale její hodnota značí jaká by měla být koncentrace uhlíku, aby při daném chemickém složení bylo dosaženo přesně eutektického složení.

### 5.4.1 Uhlíkový ekvivalent ANL

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.3 Stanovení eutektické koncentrace uhlíku, pro stanovení uhlíkového ekvivalentu ANL nelze použít vzorce užívané pro běžné litiny. Musí se brát v úvahu vysoký obsah legujících prvků, zejména niklu. Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu vysokolegovaných ANL tedy lze za určitých podmínek užít vzorce (4), (9) a (10), posledně jmenovaný vzorec navíc ještě ve spojení se vztahy uvedenými v *tab. 6*. V *tab. 23* jsou uvedeny uhlíkové ekvivalenty vypočtené podle těchto tří vzorců pro vybrané reálně odlité experimentální vzorky ANL. Je zde uvedeno i chemické složení na jehož základě byly tyto uhlíkové ekvivalenty vypočteny, resp. teploty likvidu pro vzorec (9).

**Tab. 23** – Hodnoty uhlíkového ekvivalentu vypočtené dle vzorců (4), (9) a (10)  
pro vybrané experimentální odlitky

							naměřeno	dle vzorce (4)	dle vzorce (10)	dle vzorce (9)	rozdíl	rozdíl
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
tavba/ vzorek	odlitek	C [%]	Si [%]	Ni [%]	Mn [%]	Cr [%]	Tlik. [°C]	C <sub>e</sub>	C <sub>e</sub>	C <sub>e</sub>	(10)-(4)	(9)-(4)
1	Y4	2,3	1,8	20,3	1,20	1,9	1179	3,65	3,44	4,40	-0,21	0,75
3	Y4	2,9	1,7	21	1,70	1,8	1196	4,25	4,39	4,23	0,14	-0,02
4	Y4	2,6	1,6	19,5	1,05	1,8	*	3,87	3,84	-	-0,04	-
5a	Y4	2,4	2,3	23,8	1,30	2	1205	3,98	3,94	4,15	-0,04	0,17
5b	Y4	2,4	2,3	23,8	1,30	2	1225	3,98	3,94	3,95	-0,04	-0,02
5c	Y4	2,4	2,3	23,8	1,30	2	1195	3,98	3,94	4,24	-0,04	0,27
6/1.2	sibral	3,12	1,5	20,2	0,80	1,7	1217	4,40	4,68	4,03	0,28	-0,37
6/2.2	sibral	2,51	1,6	20,3	0,70	1,5	1272	3,81	3,91	3,50	0,09	-0,32
6/3.2	sibral	2,13	1,55	20	0,65	1,3	1304	3,41	3,40	3,19	-0,01	-0,22
7/1.II	sibral	2,35	1,5	16	0,60	1,8	1296	3,47	3,18	3,27	-0,29	-0,20
7/2.II	sibral	2,34	1,5	20,5	0,60	1,7	1283	3,63	3,57	3,39	-0,06	-0,24
7/3.II	sibral	2,35	1,55	26,5	0,58	1,6	1277	3,88	4,13	3,45	0,25	-0,43
7/4.II	sibral	2,3	1,6	31,5	0,50	1,45	1272	4,03	4,54	3,50	0,51	-0,53
8	Y4	2,78	1,35	21	2,10	0,07	1200	4,06	4,73	4,19	0,68	0,14
9	Y4	2,3	4,7	33	1,10	1,7	1270	4,55	5,17	3,52	0,63	-1,03
10	Y4	1,86	3,7	32	1,20	1,8	1227	3,93	4,05	3,93	0,11	0,00
11	Y4	1,85	4,3	34	0,90	1,8	*	4,06	4,32	-	0,26	-
12/1B	sibral	2,54	0,9	19,5	0,35	0,74	1290	3,66	4,05	3,32	0,39	-0,33
12/2B	sibral	2,46	2,2	20	0,35	0,73	1253	3,88	4,27	3,68	0,39	-0,20
12/3B	sibral	2,45	3,5	20	0,35	0,7	1210	4,16	4,55	4,10	0,39	-0,06
12/4B	sibral	2,43	4,3	20	0,35	0,68	1233	4,32	4,71	3,87	0,39	-0,44
12/5B	sibral	2,39	5,5	20	0,35	0,67	1344	4,54	4,91	2,80	0,37	-1,74
13/A	sibral	1,54	2,2	18,0	0,40	0,40	1350	2,89	3,03	2,74	0,14	-0,15
13/B	sibral	1,54	2,2	18,0	0,40	0,40	1348	2,89	3,03	2,76	0,14	-0,13
13/C	sibral	2,74	2,2	18,8	0,40	0,40	1236	4,12	4,67	3,85	0,55	-0,28
13/D	sibral	2,73	2,2	18,9	0,40	0,40	1235	4,12	4,66	3,86	0,55	-0,26
14/I	sibral	1,70	5,3	33,0	0,50	0,40	1215	4,04	4,99	4,05	0,95	0,01
14/J	sibral	1,56	5,5	33,0	0,50	0,40	1220	3,93	4,81	4,00	0,88	0,07
14/K	sibral	2,26	5,3	35,0	0,50	0,40	1377	4,63	6,00	2,48	1,37	-2,15
14/L	sibral	2,13	5,3	35,0	0,50	0,40	1346	4,50	5,80	2,78	1,30	-1,72
15/G	sibral	1,50	2,8	33,0	0,35	0,40	*	3,47	4,24	-	0,77	-
15/H	sibral	1,49	2,7	33,0	0,35	0,40	*	3,44	4,21	-	0,76	-
15/O	sibral	1,45	5,4	19,5	0,36	0,40	*	3,57	3,60	-	0,03	-
15/P	sibral	1,48	5,2	19,5	0,36	0,00	*	3,55	3,88	-	0,32	-
16/G	sibral	1,51	2,4	32,5	0,45	0,40	1319	3,40	4,14	3,04	0,73	-0,36
16/H	sibral	1,49	2,5	33,0	0,45	0,40	1321	3,41	4,16	3,03	0,75	-0,39
16/O	sibral	1,55	5,7	19,0	0,70	0,45	1237	3,73	3,71	3,84	-0,02	0,11
16/P	sibral	1,50	6,0	19,3	0,70	0,45	1247	3,75	3,71	3,74	-0,04	-0,01
17/E	sibral	2,55	4,9	18,9	0,40	0,37	1337	4,55	5,04	2,87	0,50	-1,68
17/F	sibral	2,55	5,0	18,8	0,36	0,38	1345	4,57	5,05	2,79	0,49	-1,77
17/M	sibral	2,48	2,7	31,3	0,38	0,38	1338	4,38	5,48	2,86	1,10	-1,52
17/N	sibral	2,49	2,8	31,4	0,38	0,36	1337	4,41	5,53	2,87	1,13	-1,54

\* teplota likvidu nebyla u tohoto vzorku změřena, tudíž nemohl být vypočten C<sub>e</sub> dle vzorce (9)

V prvním sloupci této tabulky je uvedeno číslo tavby ze které pochází daný vzorek. V případě, že z jedné tavby bylo odlito více vzorků, pak je značení v tomto sloupci ve formátu číslo tavby lomeno číslo vzorku z této tavby. Ve druhém sloupci je uvedeno o jaký typ odlitku se jedná, „Y4“ značí kýlový blok Y4 a „sibral“ zkušební odlitek popsany v kapitole 4.1. Ve třetím až sedmém sloupci je chemické složení jednotlivých vzorků. V osmém sloupci jsou uvedeny teploty likvidu naměřené u těchto vzorků. V devátém sloupci jsou vypočítané uhlíkové ekvivalenty pro jednotlivé vzorky podle nejčastěji používaného vzorce (4), tedy na základě koncentrace uhlíku, křemíku a niklu. V desátém sloupci jsou vypočítané hodnoty uhlíkového ekvivalentu na základě vzorce (10) a vzorců z *tab. 6* s uvažováním obsahu uhlíku, křemíku, niklu, manganu a chromu. A v jedenáctém sloupci jsou uvedeny hodnoty  $C_e$  vypočtené dle vzorce (9), tedy na základě teploty likvidu.

Předposlední sloupec s číslem 12 pak ukazuje rozdíl mezi výpočtem  $C_e$  podle vzorce (10) a vzorce (4). Zde je vidět, že pokud se obsah niklu a křemíku pohybuje na nižších koncentracích, tedy nikl přibližně kolem 20 % a křemík asi kolem 2 %, nejsou rozdíly ve výpočtech uhlíkového ekvivalentu podle těchto dvou vzorců nijak zásadně odlišné. Rozdíly činí několik málo setin příp. desetin procenta. Pokud je však koncentrace niklu či křemíku vysoká (přes cca 30 % Ni resp. asi 4 až 5 % Si), rozdíly ve vypočtených uhlíkových ekvivalentech se zvyšují a pohybují se zhruba kolem 0,5 %. Největší vliv však má pokud je vysoký obsah niklu a současně i křemíku příp. uhlíku. V takovém případě již mohou rozdíly ve výsledcích výpočtu  $C_e$  podle vzorce (4) a (10) činit i více než 1 %. Největší zjištěný rozdíl činí 1,3 % pro koncentraci Ni = 35,0 %, Si = 5,3 % a C = 2,26 %. S rostoucím obsahem legujících prvků roste výrazněji hodnota  $C_e$  počítaná podle vzorce (10) než podle (4). To je dáno tím, že vzorec (10) je platný pro nízko a středně legované litiny a s rostoucím obsahem legujících prvků se již významně zvyšuje chyba ve výpočtu podle tohoto vzorce. Z toho tedy plyne, že vzorec (10) ve spojení se vzorci s *tab. 6* je možné používat pro stanovení uhlíkového ekvivalentu ANL, ale pouze u značek s nižším obsahem legujících prvků, typicky pro materiály typu D2. Naproti tomu pro značky typu D4 a D5 s vysokým obsahem niklu a křemíku je tento vzorec nevhodný.

Poslední sloupec *tab. 23* s číslem 13 pak ukazuje rozdíl mezi uhlíkovým ekvivalentem vypočteným podle vzorce (9) a podle (4). Jak již bylo uvedeno výše, vzorec (9) byl stanoven pro chemické složení ANL odpovídající značce D5-S, tedy s vysokým obsahem niklu a křemíku. Proto je při pohledu do posledního sloupce *tab. 23* poněkud překvapující, že právě u vzorků s vysokým obsahem niklu a křemíku došlo k největším chybám a odchylkám od výsledků vypočtených pomocí běžně používaného vzorce (4), a to až o 2,15 %. Při bližším prozkoumání však dojdeme k tomu, že chyba je způsobena vyšším obsahem uhlíku ve vzorku. Tento vzorec totiž platí pouze v úzkém rozmezí koncentrací uhlíku, křemíku a niklu viz. *tab. 5*. Pokud je obsah těchto prvků jiný a to zejména u uhlíku, dochází k nezanedbatelným chybám. To je dobře patrné např. na vzorcích 14/K a 14/L v *tab. 23*. Zde leží koncentrace niklu v intervalu platnosti vzorce (9), obsah křemíku je jen velmi těsně nad tímto intervalem, ale obsah uhlíku je výrazně překročen. Zde je pak rozdíl ve vypočtených uhlíkových ekvivalentech 2,15 resp. 1,72 %. Pokud se však podíváme na vzorky 14/I a 14/J uvidíme hlavní rozdíl. Koncentrace křemíku a niklu je velice podobná jako u předchozích dvou vzorků, ale zato obsah uhlíku je výrazně nižší a již leží v intervalu platnosti vzorce (9). Nyní jsou již rozdíly mezi výpočtem  $C_e$  podle vzorců (9) a (4) pouze 0,01 resp. 0,07 %. Proto je při použití vzorce (9) velmi důležité zkontrolovat, jestli koncentrace uhlíku, křemíku a niklu leží v intervalu platnosti tohoto vzorce. Pokud ano, vzorec funguje velmi dobře a výsledky jsou přesné. Pokud ale leží koncentrace těchto prvků a zejména pak uhlíku, mimo tento interval, mohou vznikat velké chyby ve vypočtených hodnotách.



### 5.4.2 Eutektická koncentrace uhlíku

Jedním z důležitých cílů této práce byl výpočet eutektické koncentrace uhlíku pro libovolné chemické složení tavby. Tento výpočet je popsán v kapitole 3.3. Hlavní myšlenkou je, že při eutektické teplotě je Raoultova aktivita uhlíku v tavenině rovna jedné, a to jak v jednoduché soustavě Fe-C tak i v polykomponentní Fe-C-Si-Ni-...-Me. Na základě rovnice (14) je pak vypočtena eutektická koncentrace uhlíku přesně odpovídající konkrétnímu zadanému chemickému složení. Pak lze jednoduchým srovnáním takto vypočtené hodnoty s koncentrací uhlíku reálně obsaženou v tavbě zjistit, jak daleko je složení tavby od eutektického, příp. kolik uhlíku je třeba dodat pro jeho dosažení. Tento termodynamický výpočet je implementován v programu *Výpočet lici teploty litin Ni-resist*. V tab. 24 jsou pomocí tohoto programu vypočteny hodnoty eutektických koncentrací uhlíku odpovídající chemickému složení odlitých zkušebních vzorků.

**Tab. 24** – Hodnoty eutektických koncentrací uhlíku vypočtené na základě termodynamického výpočtu a srovnání s výpočtem uhlíkového ekvivalentu dle vzorce (4)

							termodynamickým výpočtem		dle vzorce (4)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
tavba/ vzorek	odlitek	C [%]	Si [%]	Ni [%]	Mn [%]	Cr [%]	eutektická konc.C		C <sub>e</sub>	
1	Y4	2,3	1,8	20,3	1,20	1,9	3,16	podeut.	3,65	podeut.
3	Y4	2,9	1,7	21	1,70	1,8	3,19	podeut.	4,25	podeut.
4	Y4	2,6	1,6	19,5	1,05	1,8	3,23	podeut.	3,87	podeut.
5a	Y4	2,4	2,3	23,8	1,30	2	2,92	podeut.	3,98	podeut.
5b	Y4	2,4	2,3	23,8	1,30	2	2,92	podeut.	3,98	podeut.
5c	Y4	2,4	2,3	23,8	1,30	2	2,92	podeut.	3,98	podeut.
6/1.2	sibral	3,12	1,5	20,2	0,80	1,7	3,23	podeut.	4,40	NADEUT.
6/2.2	sibral	2,51	1,6	20,3	0,70	1,5	3,16	podeut.	3,81	podeut.
6/3.2	sibral	2,13	1,55	20	0,65	1,3	3,10	podeut.	3,41	podeut.
7/1.II	sibral	2,35	1,5	16	0,60	1,8	3,37	podeut.	3,47	podeut.
7/2.II	sibral	2,34	1,5	20,5	0,60	1,7	3,18	podeut.	3,63	podeut.
7/3.II	sibral	2,35	1,55	26,5	0,58	1,6	2,93	podeut.	3,88	podeut.
7/4.II	sibral	2,3	1,6	31,5	0,50	1,45	2,72	podeut.	4,03	podeut.
8	Y4	2,78	1,35	21	2,10	0,07	3,14	podeut.	4,06	podeut.
9	Y4	2,3	4,7	33	1,10	1,7	2,08	NADEUT.	4,55	NADEUT.
10	Y4	1,86	3,7	32	1,20	1,8	2,28	podeut.	3,93	podeut.
11	Y4	1,85	4,3	34	0,90	1,8	2,10	podeut.	4,06	podeut.
12/1B	sibral	2,54	0,9	19,5	0,35	0,74	3,29	podeut.	3,66	podeut.
12/2B	sibral	2,46	2,2	20	0,35	0,73	2,95	podeut.	3,88	podeut.
12/3B	sibral	2,45	3,5	20	0,35	0,7	2,65	podeut.	4,16	podeut.
12/4B	sibral	2,43	4,3	20	0,35	0,68	2,48	podeut.	4,32	NADEUT.
12/5B	sibral	2,39	5,5	20	0,35	0,67	2,24	NADEUT.	4,54	NADEUT.
13/A	sibral	1,54	2,2	18,0	0,40	0,40	2,96	podeut.	2,89	podeut.
13/B	sibral	1,54	2,2	18,0	0,40	0,40	2,96	podeut.	2,89	podeut.
13/C	sibral	2,74	2,2	18,8	0,40	0,40	2,98	podeut.	4,12	podeut.
13/D	sibral	2,73	2,2	18,9	0,40	0,40	2,97	podeut.	4,12	podeut.
14/I	sibral	1,70	5,3	33,0	0,50	0,40	1,84	podeut.	4,04	podeut.
14/J	sibral	1,56	5,5	33,0	0,50	0,40	1,79	podeut.	3,93	podeut.
14/K	sibral	2,26	5,3	35,0	0,50	0,40	1,82	NADEUT.	4,63	NADEUT.
14/L	sibral	2,13	5,3	35,0	0,50	0,40	1,81	NADEUT.	4,50	NADEUT.

**pokračování Tab. 24** – Hodnoty eutektických koncentrací uhlíku vypočtené na základě termodynamického výpočtu a srovnání s výpočtem uhlíkového ekvivalentu dle vzorce (4)

							termodynamickým výpočtem		dle vzorce (4)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
tavba/ vzorek	odlitek	C [%]	Si [%]	Ni [%]	Mn [%]	Cr [%]	eutektická konc.C		C <sub>e</sub>	
15/G	sibral	1,50	2,8	33,0	0,35	0,40	2,29	podeut.	3,47	podeut.
15/H	sibral	1,49	2,7	33,0	0,35	0,40	2,31	podeut.	3,44	podeut.
15/O	sibral	1,45	5,4	19,5	0,36	0,40	2,20	podeut.	3,57	podeut.
15/P	sibral	1,48	5,2	19,5	0,36	0,00	2,24	podeut.	3,55	podeut.
16/G	sibral	1,51	2,4	32,5	0,45	0,40	2,39	podeut.	3,40	podeut.
16/H	sibral	1,49	2,5	33,0	0,45	0,40	2,35	podeut.	3,41	podeut.
16/O	sibral	1,55	5,7	19,0	0,70	0,45	2,18	podeut.	3,73	podeut.
16/P	sibral	1,50	6,0	19,3	0,70	0,45	2,11	podeut.	3,75	podeut.
17/E	sibral	2,55	4,9	18,9	0,40	0,37	2,38	NADEUT.	4,55	NADEUT.
17/F	sibral	2,55	5,0	18,8	0,36	0,38	2,36	NADEUT.	4,57	NADEUT.
17/M	sibral	2,48	2,7	31,3	0,38	0,38	2,42	NADEUT.	4,38	NADEUT.
17/N	sibral	2,49	2,8	31,4	0,38	0,36	2,39	NADEUT.	4,41	NADEUT.

Stejně jako v případě *tab.23* je i zde v prvním sloupci uvedeno číslo tavby lomeno číslem vzorku. Ve druhém sloupci opět typ odlitku, tedy jestli se jednalo o kýlový blok Y4 či o zkušební odlitek dle kapitoly 4.1. Třetí až sedmý sloupec pak popisuje chemické složení těchto vzorků. V osmém sloupci této tabulky jsou uvedeny zmíněné vypočtené hodnoty eutektických koncentrací uhlíku a v devátém sloupci je uvedeno srovnání vypočtené hodnoty eutektické koncentrace uhlíku se skutečným obsahem uhlíku. Je-li vypočtená hodnota eutektické koncentrace uhlíku větší než jeho skutečná koncentrace, jedná se o podeutektickou ANL a v tomto sloupci je uvedeno „podeut.“. V opačném případě se jedná o nadeutektické složení a to je v tabulce označeno „NADEUT.“. Předposlední sloupec s číslem 10 obsahuje hodnoty uhlíkového ekvivalentu vypočtené dle nejčastěji užívaného vzorce (4). V posledním, jedenáctém sloupci je pak uvedeno, zda se dle tohoto vzorce jedná o nadeutektickou či podeutektickou ANL.

Údaje o podeutektičnosti či nadeutektičnosti litin v devátém a jedenáctém sloupci si vzájemně poměrně dobře odpovídají. Výjimkou jsou však vzorky 6/1.2 a 12/4B. Zde je vidět, že podle vzorce (4) jsou označeny za nadeutektické, zatímco podle termodynamického výpočtu za podeutektické. Vysvětlení spočívá v tom, že vzorec (4) bere v úvahu pouze vliv uhlíku, křemíku a niklu, zatímco termodynamický výpočet uvažuje i vliv ostatních prvků. V tomto případě zde hraje důležitou roli chrom. Ten snižuje aktivitu uhlíku a posouvá tak eutektický bod k vyšším koncentracím uhlíku. Např. u vzorku 6/1.2 je vypočtená eutektická koncentrace uhlíku 3,23 % zatímco skutečný obsah uhlíku je 3,12 %. Tento vzorek totiž obsahuje 1,7 % chromu, což je již nezanedbatelné množství. Pokud by byl obsah chromu nulový, byla by vypočtená eutektická koncentrace uhlíku 3,09 % a složení by opravdu bylo nadeutektické. Ovšem zmíněných 1,7 % chromu stačí k tomu, aby došlo ke zvýšení eutektické koncentrace uhlíku na 3,23 % a složení bylo tudíž podeutektické. U vzorku 12/4B je situace obdobná. Skutečný obsah uhlíku v tomto vzorku je 2,43 %. Pokud by nebyl obsažen chrom, byla by vypočtená eutektická koncentrace uhlíku také 2,43 %, tedy přesně eutektické složení. Materiál však obsahuje 0,68 % chromu, což vypočtenou eutektickou koncentraci uhlíku zvýší na 2,48 %. To znamená, že složení je těsně podeutektické.

Z výše uvedeného je patrné, že pokud se složení ANL pohybuje v blízkosti eutektického bodu a hrozí tudíž, že dojde k jeho překročení se všemi negativy z toho vyplývajících, je užití vzorce

(4) pro stanovení uhlíkového ekvivalentu nespolehlivé a je vhodnější použít termodynamický výpočet pro stanovení přesné eutektické koncentrace uhlíku.

## 5.5 PROGRAM „VÝPOČET LICÍ TEPLoty LITIN Ni-RESIST“ A NÁVOD K JEHO OVLÁDÁNÍ

Pro potřeby praxe a operativní využití výše uvedených poznatků byl sestaven počítačový program, který po zadání chemického složení tavby vypočte metalurgické parametry, jejichž znalost je při výrobě odlitků z ANL důležitá. Patří mezi ně zejména eutektická koncentrace uhlíku, uhlíkový ekvivalent, koeficient určující sklon k tvorbě chunky grafitu a niklový ekvivalent posuzující stabilitu austenitické matrice. Další velmi důležitou funkcí tohoto programu je výpočet eutektické teploty a zejména pak teploty likvidu, na jejímž základě je po zadání požadovaného přehřátí a ztráty teploty kovu v pánvi vypočtena lící a odpichová teplota. Obr. 38 ukazuje vzhled pracovního okna programu *Výpočet lící teploty litin Ni-resist*. Tento program je k dispozici na CD jako příloha 2 této práce.

**Výpočet lící teploty litin Ni-resist**

Manuál

**Vstupní parametry**

Požadované chemické složení v hmotnostních %

% C 2,9    % Mn 1,7    % Si 1,7    % Cr 1,8    % Ni 21    % Me

Teplota přehřátí 80 °C    Ztráta teploty kovu v pánvi 50 °C     $A_r =$

**Výstupní parametry**

Kritérium pro Chunky grafit: 4,50 < 4,4 %

Eutekt. koncentrace uhlíku: 3,19 %

Uhlíkový ekvivalent: 4,25

Niklový ekvivalent: 26,20

Eutektická teplota: 1190 °C

Teplota likvidu: 1234 °C

Lící teplota: 1314 °C

Odpichová teplota: 1364 °C

Použitá termodynamická data

Výpočet    Konec

**ZDAS METALURGIE**    **FSI**

VUT FSI  
ÚST - odbor slévárenství

Autoři: Šenberger, J.; Čech, J.; Záděra, A.; Kaňa, V.; Karpíšek, Z.; Martišek, K.

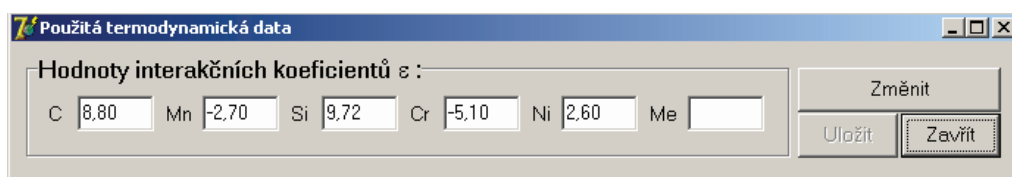
**Obr. 38** – Vzhled pracovního okna programu *Výpočet lící teploty litin Ni-resist*

Horní polovina pracovního okna slouží pro zadávání vstupních parametrů. Do příslušných políček se zde zadají obsahy jednotlivých základních prvků ANL. Těmito prvky jsou uhlík, mangan, křemík, chrom a nikl. V případě potřeby je možno doplnit i další libovolný chemický prvek. Jeho hmotnostní koncentrace se запиše do políčka „% Me“, pak je ještě nutno do pole „ $A_r$ “ zadat relativní atomovou hmotnost tohoto prvku v jednotkách  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$  (např. pro měď je relativní atomová hmotnost  $63,55 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). Dále následuje zadání požadované teploty přehřátí. Ta vyjadřuje rozdíl mezi lící teplotou a teplotou likvidu. Vzhledem k tomu, že ANL neprodělávají během tuhnutí přeměnu struktury je vhodné volit tento parametr co nejnižší, ovšem s ohledem na zaběhnutí odlévaného odlitku. A poslední zadávanou hodnotou je ztráta

teploty kovu v pánvi. Ta vyjadřuje rozdíl mezi odpichovou a lící teplotou. Udává pokles teploty kovu v pánvi, který nastává během odpichu a během odstátí kovu v pánvi před vlastním litím. Jeho hodnota je dána velikostí lící pánve a množstvím tekutého kovu. Při odlévání malých množství do cca 100kg je možné počítat s poklesem větším než 100 °C.

Po stisknutí tlačítka „Výpočet“ se v dolní polovině pracovního okna zobrazí vypočtené výstupní parametry. Těmi jsou:

- Kritérium pro chunky grafit [-] – jedná se o empiricky odvozené kritérium z literárních údajů podle vzorce (6) platného pro odlitky s dobou chladnutí menší než 40 minut. Podle tohoto kritéria je vznik chunky velmi pravděpodobný, jestliže je na pravé straně vzorce číslo větší než 4,4. Uvedený vzorec nezohledňuje vliv doprovodných prvků. Přítomnost céru a vápníku může rovněž vyvolat vznik chunky grafitu.
- Eutektická koncentrace uhlíku [hmot.% C] – je hodnota koncentrace uhlíku, při níž je pro zadané chemické složení dosaženo eutektického složení. Rozdíl mezi eutektickou koncentrací uhlíku a koncentrací uhlíku skutečně obsaženou v materiálu určuje odchylku od eutektické koncentrace při konkrétním daném chemickém složení ANL. Hodnota eutektické koncentrace uhlíku je stanovena na základě termodynamického výpočtu dle kapitoly 3.3 s využitím termodynamických dat – interakčních koeficientů. Na *obr. 39* je vzhled okna „Použitá termodynamická data“, které se zobrazí po stisknutí tlačítka „Použitá termodynamická data“. Zde je možno měnit interakční koeficienty sloužící k výpočtu eutektické koncentrace uhlíku. Změna těchto dat je vyhrazena pouze správci programu po zadání vstupního hesla při stisknutí tlačítka „Změnit“. Výpočet eutektické koncentrace uhlíku je nezávislý na zvoleném chemickém složení a jeho stanovení je tak možno provést pro libovolné chemické složení a poměry legujících prvků.



**Obr. 39** – Vzhled okna „Použitá termodynamická data“

- Uhlíkový ekvivalent [-] – jedná se o základní charakteristiku používanou v metalurgii litin. Pro stanovení uhlíkového ekvivalentu v ANL je v programu používána rovnice (4) převzatá z literatury.
- Niklový ekvivalent [-] – umožňuje posoudit vliv chemického složení na stabilitu austenitické matrice. V programu je ke stanovení niklového ekvivalentu použita rovnice (1) převzatá z literatury. Podle tohoto vztahu by měla být minimální hodnota niklového ekvivalentu vyšší nebo rovna hodnotě 23,5.
- Eutektická teplota [°C] – zobrazuje eutektickou teplotu vypočtenou pomocí vzorce (28) stanoveného regresní analýzou. Interval platnosti výpočtu eutektické teploty je uveden v *tab. 16*.
- Teplota likvidu [°C] – zobrazuje teplotu likvidu vypočtenou pomocí vzorce (29) stanoveného regresní analýzou. Interval platnosti výpočtu eutektické teploty je uveden v *tab. 16*.
- Lící teplota [°C] – zobrazuje optimální lící teplotu pro dané chemické složení ANL stanovenou jako součet vypočtené teploty likvidu a teploty přehřátí zadané ve vstupních parametrech.



- Odpichová teplota [°C] – zobrazuje optimální odpichovou teplotu pro dané chemické složení ANL stanovenou jako součet vypočtené lící teploty a ztráty teploty v pánvi zadané ve vstupních parametrech.

**Tab. 16** – Interval platnosti výpočtu eutektické teploty a teploty likvidu

%C	%Si	%Cr	%Ni
1,73 – 3,12	0,90 – 5,5	0,67 – 1,8	16,0 – 31,5

V případě potřeby lze kdykoliv během používání programu zmáčknutím tlačítka „Manuál“, umístěného v pravém horním rohu pracovního okna, zobrazit podrobný návod k ovládání programu *Výpočet lící teploty litin Ni-resist*.

## 5.6 FILTRACE ODLITKŮ Z ANL

Cílem experimentu bylo posoudit možnost a účelnost filtrace ANL, a to na základě zkoumání množství a původu vměstků před filtrem, v prostorách filtru a za filtrem. Předpokládalo se, že na filtru budou zachyceny vměstky vzniklé reakcí taveniny s modifikátorem a s očkovacími tělísky umístěnými před filtrem. Dále bylo cílem posoudit účinnost filtrace při zachycování exogenních vměstků pocházejících ze vtokové soustavy.

Tavení a odlévání této experimentální tavby proběhlo ve slévárně Žďas a.s. Tavicím agregátem byla zásaditá elektrická oblouková pec. Modifikace byla provedena přísazením modifikátoru na hladinu kovu v pánvi po odpichu. Pro modifikaci byla použita předslitina NiMg6 bez obsahu KVZ. Pro očkování bylo použito očkovací tělísko Germalloy umístěné v lící jamce. Odlévalo se z pánve se spodní výpustí. Forma byla na lící straně tvořena chromitem, výplňová směs pak byla z křemenného ostríva. Jako pojivo byla u obou směsí furanová pryskyřice. Lící teplota byla 1380°C. Chemické složení odlévaného materiálu určené ze vzorku odebraného z lící pánve je uvedeno v *tab. 25*. Uvedené chemické složení odpovídá značce D2-C.

**Tab. 25** – Chemické složení odlévané ANL

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mg
2,78	1,35	2,10	0,030	0,002	0,07	21,0	0,05

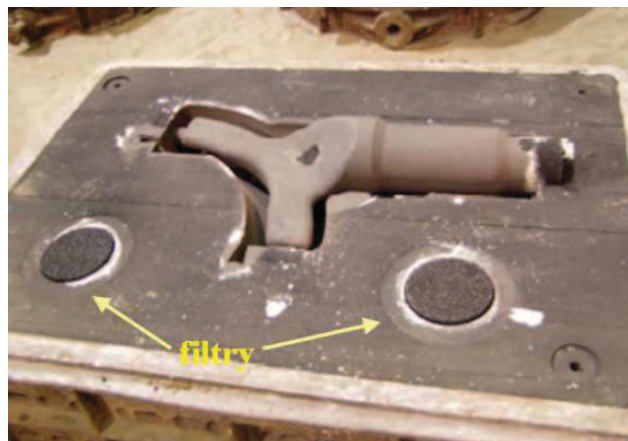
Použity byly dva kruhové pěnové keramické filtry Stelex PrO od firmy Foseco o průměru 200 mm. Pórovitost filtrů byla 10 ppi. U použitých filtrů byla provedena analýza chemického složení materiálu filtru pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu Philips XL 30 ve spojení s energiově disperzním analyzátozem – EDAX. Zjištěné výsledky jsou uvedeny v *tab. 26*.

**Tab. 26** – Zjištěné chemické složení použitých filtrů

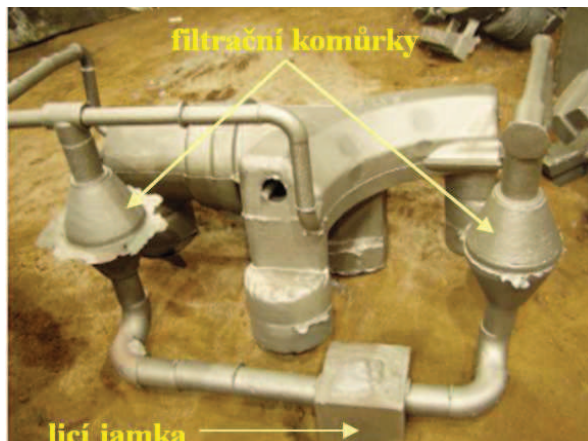
Prvky identifikované ve filtru v atomových %				
C	O	Al	Si	Fe
68,51	21,73	7,72	1,66	0,38

Analyzovaný obsah uhlíku je sice pouze informativní, neboť přístroj neumožňuje přesně určit jeho koncentraci, nicméně z této tabulky i z údajů uváděných výrobcem vyplývá, že materiál filtrů je na bázi SiC a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Filtry byly umístěny do filtračních komůrek ve vtokové soustavě odlitku vytvořené ze šamotových tvarovek (viz. *obr. 40* a *obr. 41*). Hmotnost surového odlitku činila 920 kg, což tedy znamená, že každým z filtrů proteklo přibližně 450 kg kovu.



**Obr. 40** – Forma se založenými filtry [46]



**Obr. 41** – Surový odlitek po otryskání [46]  
(pozn. odlitek leží vzhůru nohama)

Z filtrační komůrky byl poté vyříznut hranolek obsahující filtr a kov před ním i za ním. Z tohoto hranolku byly zhotoveny čtyři vzorky pro následné metalografické hodnocení (viz *obr. 42*). Tyto vzorky byly dále připraveny běžnými postupy, tedy broušením za mokra a leštěním. Vzorek 1 reprezentuje kov před filtrem. Vzorek 2 kov těsně před filtrem a první polovinu filtru. Vzorek 3 druhou polovinu filtru a kov těsně za filtrem. A vzorek 4 kov dále za filtrem.

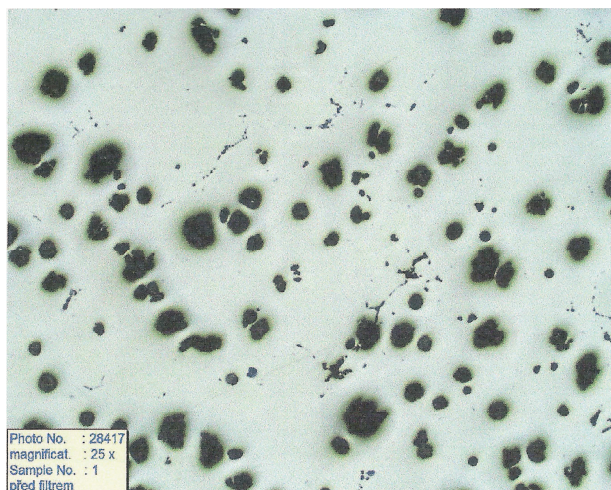


**Obr. 42** – Rozřezový plán vzorku kovu se zalitým filtrem [46]

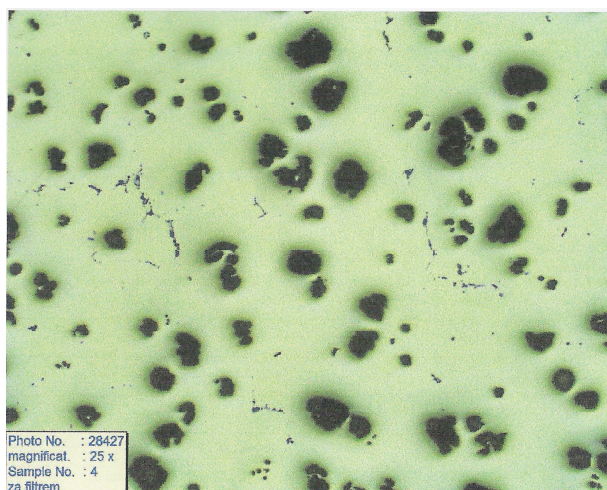
### 5.6.1 Pozorování světelným mikroskopem

Takto připravené vzorky byly napřed zkoumány pomocí světelného mikroskopu OLYMPUS GX71. Při tomto pozorování bylo v materiálu nalezeno značné množství ředin, a to zejména v kovu před a za filtrem (viz. *obr. 43* a *obr. 44*). Velikost kuliček grafitu před i za filtrem činila přibližně 100  $\mu\text{m}$ . Uvnitř filtru však byl pozorován grafit ve formě lupínků (viz. *obr. 45*).

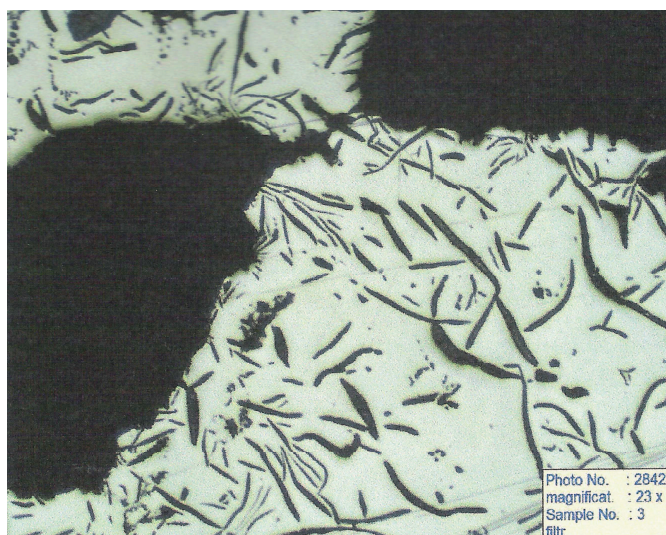




**Obr. 43** - Řediny a kuličkový grafit před filtrem [46]



**Obr. 44** - Řediny a kuličkový grafit za filtrem [46]

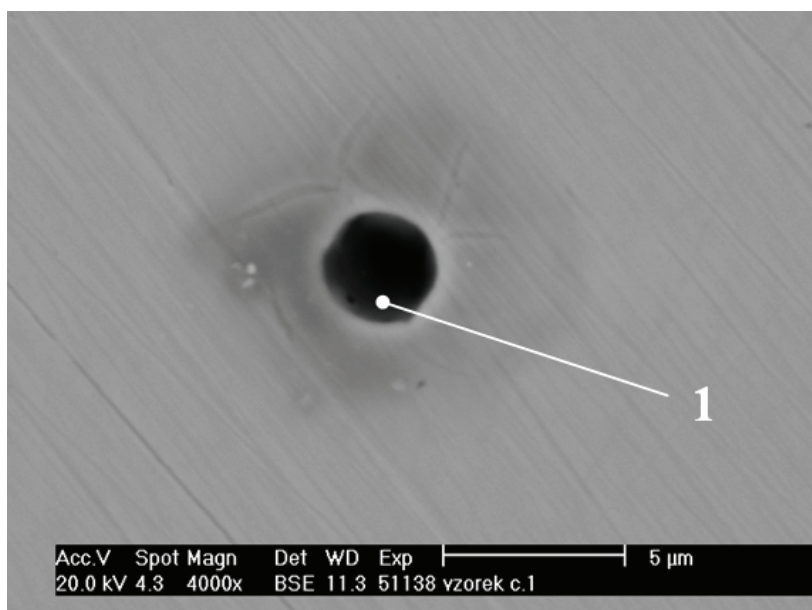


**Obr. 45** - Lupínkový grafit v kovu ve filtru [46]

### 5.6.2 Pozorování rastrovacím elektronovým mikroskopem

Po tomto prvotním pozorování pod světelným mikroskopem následovaly podrobnější analýzy s využitím rastrovacího elektronového mikroskopu Philips XL 30 ve spojení s energiově disperzním analyzátozem – EDAX.

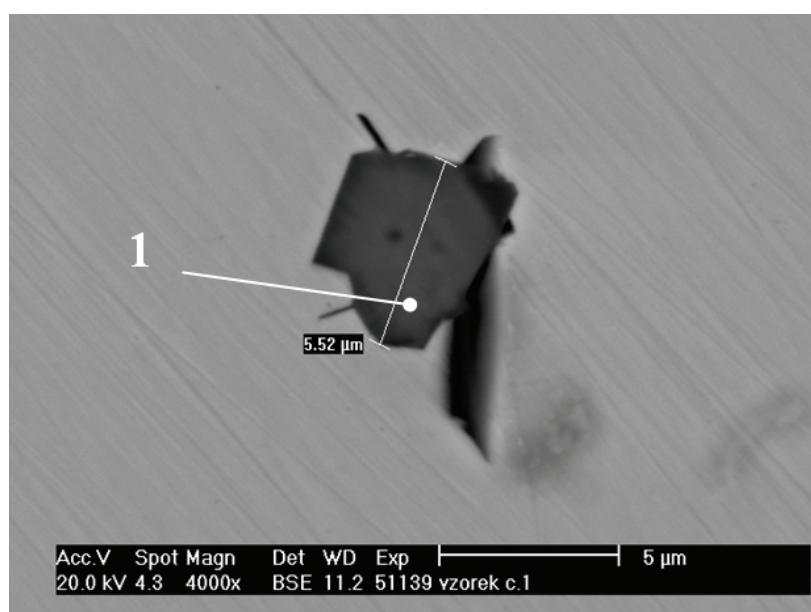
**Před filtrem (30-5mm)** - materiál s relativně malým obsahem vměstků o velikosti řádově do 10  $\mu\text{m}$ . Podle chemického složení se jednalo o oxidy hořčíku příp. nitridy či karbonitridy titanu, které dále obsahovaly zirkonium, niob, wolfram, vanad aj. Na *obr. 46* je jako příklad uveden oxid hořčíku, na *obr. 47* pak nitrid titanu.



vz. 1		Identifikované prvky v atomových %								
Snímek	Místo	C	O	Mg	Si	S	Ca	Mn	Fe	Ni
51138	1	?	21,43	18,66	2,21	1,00	0,66	1,51	42,07	12,46

? značí, že uhlík byl v daném místě identifikován, avšak přístroj neumožňuje určit jeho přesnou koncentraci

**Obr. 46** - Oxid hořčíku nalezený v kovu před filtrem [46]

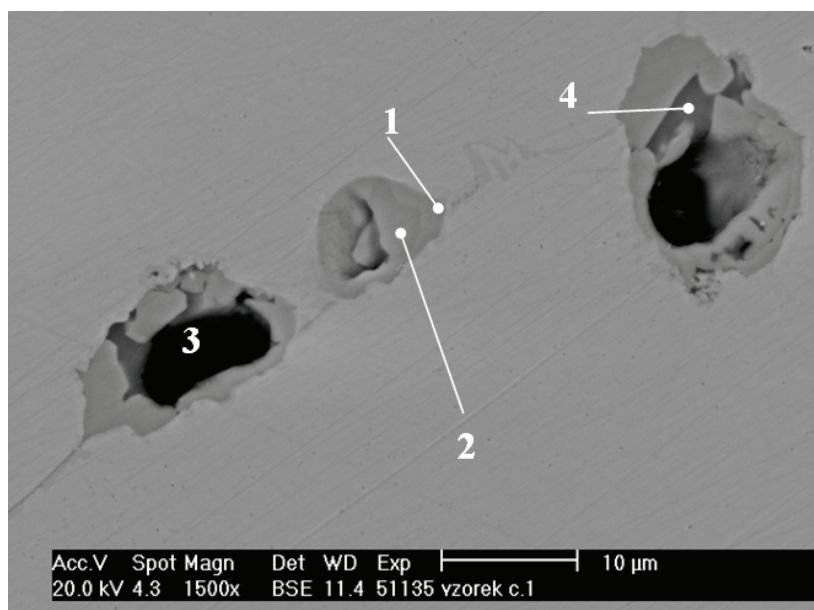


vz. 1		Identifikované prvky v atomových %							
Snímek	Místo	C	N	Mg	Si	Zr	Nb	Ti	Fe
51139	1	?	43,73	16,13	0,16	0,46	0,20	38,05	1,27

? značí, že uhlík byl v daném místě identifikován, avšak přístroj neumožňuje určit jeho přesnou koncentraci

**Obr. 47** - Nitrid titanu nalezený v kovu před filtrem [46]

V materiálu byly pozorovány četné řediny, ve kterých se nacházely oxidy hořčíku. Na okrajích těchto ředin byly analyzovány fáze bohaté na nikl, hořčík a mangan. Jednalo se zřejmě o segregace do míst posledního tuhnutí (viz obr. 48).



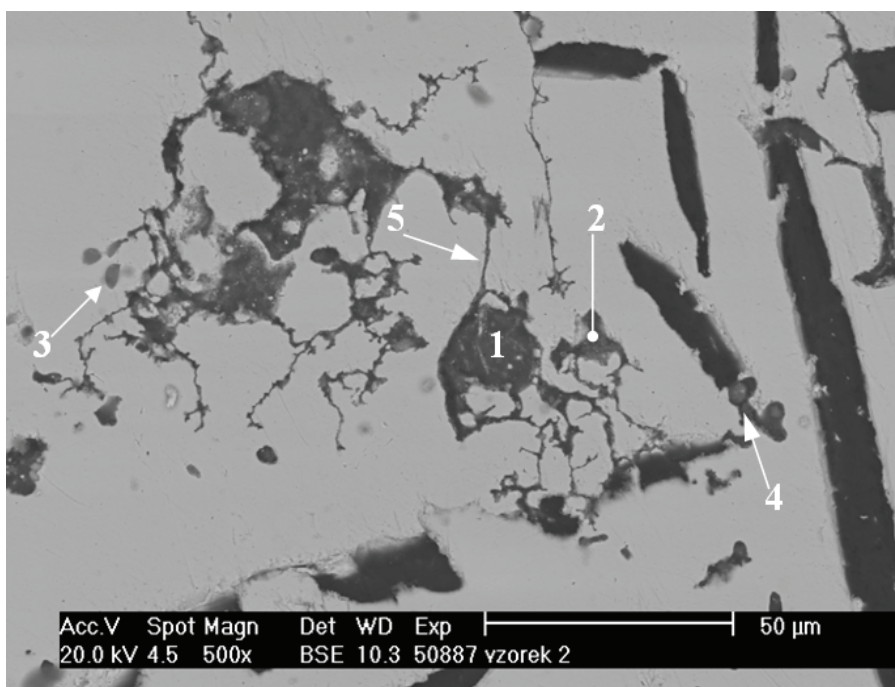
vz. 1		Identifikované prvky v atomových %						
Snímek	Místo	O	Mg	Si	P	Mn	Fe	Ni
51135	1	-	31,38	6,51	7,51	3,11	8,93	42,56
	2	-	18,84	0,91	-	8,13	49,17	22,94
	3	60,03	37,07	-	-	0,38	1,70	0,82
	4	12,11	50,60	-	-	1,64	8,11	27,54

**Obr. 48** – Ředina obsahující segregace a oxidy [46]

Na pozorovaném vzorku nebyly nalezeny žádné makroskopické vměstky svědčící o „rozplaveném písku“ zachyceném na filtru.

**Těsně před filtrem (5-0mm)** - byl pozorován filtrační koláč o tloušťce několika set  $\mu\text{m}$ . Ve filtračním koláči byly analyzovány vměstky na bázi sulfidů a oxidů hořčíku a vápníku a několik zrn ostřiva  $\text{SiO}_2$ . Jednotlivé vměstky byly drobné - do 10  $\mu\text{m}$ . Složení vměstků nejčastěji odpovídalo oxidům hořčíku (viz. obr. 49).

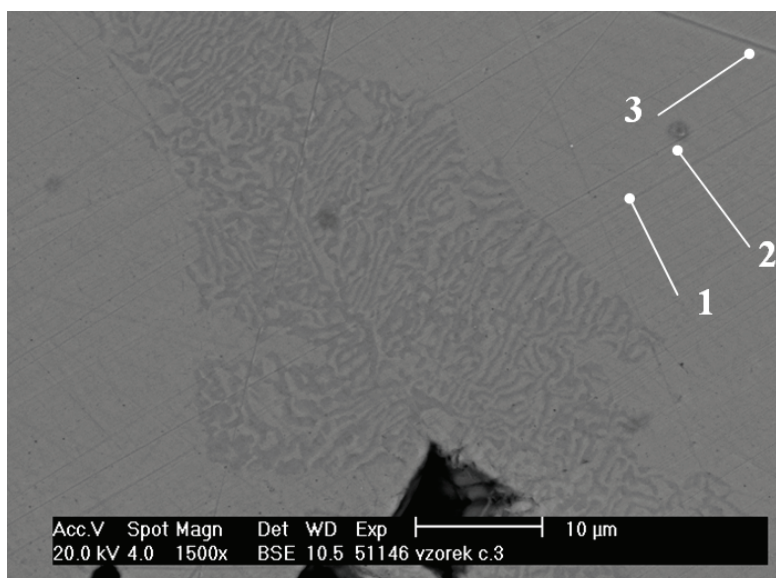




vz. 2		Identifikované prvky v atomových %								
Snímek	Místo	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe	Ni
50887	1	58,09	34,48	-	0,43	3,91	0,38	0,18	1,92	0,62
	2	45,13	34,96	-	0,48	7,34	2,66	0,86	7,45	1,13
	3	42,05	25,07	-	0,71	13,51	1,80	0,88	13,43	2,55
	4	40,79	42,50	12,02	-	1,51	-	-	1,32	1,87
	5	35,42	32,70	-	2,53	2,71	0,56	0,96	19,56	5,55

**Obr. 49** - Shluky vměstků v těsné blízkosti před filtrem [46]

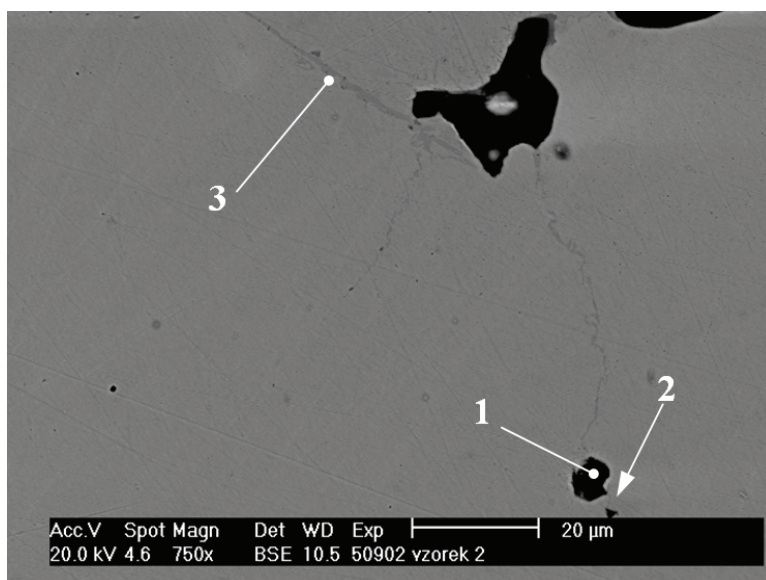
Před filtrem se rovněž nacházely segregace bohaté na nikl, hořčík a mangan. V některých těchto segregacích byl analyzován vysoký obsah fosforu (4,22 až 6,65 at.% P). V okolí zmíněných segregací byl zjištěn i v matici vyšší obsah manganu a nižší obsah niklu. Matrice vykazovala při větších zvětšeních (nad 500x) „lamelární strukturu“. Vzhled této struktury je dobře patrný na *obr. 50*. Zkratka „pl. an.“ užívaná v některých tabulkách chemických analýz připojených k obrázkům znamená plošnou analýzu chemického složení. *Obr. 50* byl pořízen z materiálu za filtrem, avšak vzhled lamelární struktury byl stejný jak v materiálu před filtrem tak i za ním. Pro tuto strukturu byl charakteristický vysoký obsah manganu. Vysoký obsah manganu byl analyzován i v některých místech odpovídajících hranicím zrn (viz. místo 3 na *obr. 51*).



vz. 3		Identifikované prvky v atomových %				
Snímek	Místo	C	Si	Mn	Fe	Ni
-	pl. an. „lamel. struktury“	?	2,86	11,74	72,18	13,23
51146	1 (5μm od „lamel. strukt.“)	?	3,72	5,84	78,09	12,35
	2 (10μm od „lamel. strukt.“)	?	3,55	5,28	77,95	13,22
	3 (20μm od „lamel. strukt.“)	?	4,89	3,99	75,47	15,64
-	matrice mimo „lamel. strukt.“	?	4,12	2,45	71,37	22,06

? značí, že uhlík byl v daném místě identifikován, avšak přístroj neumožňuje určit jeho přesnou koncentraci

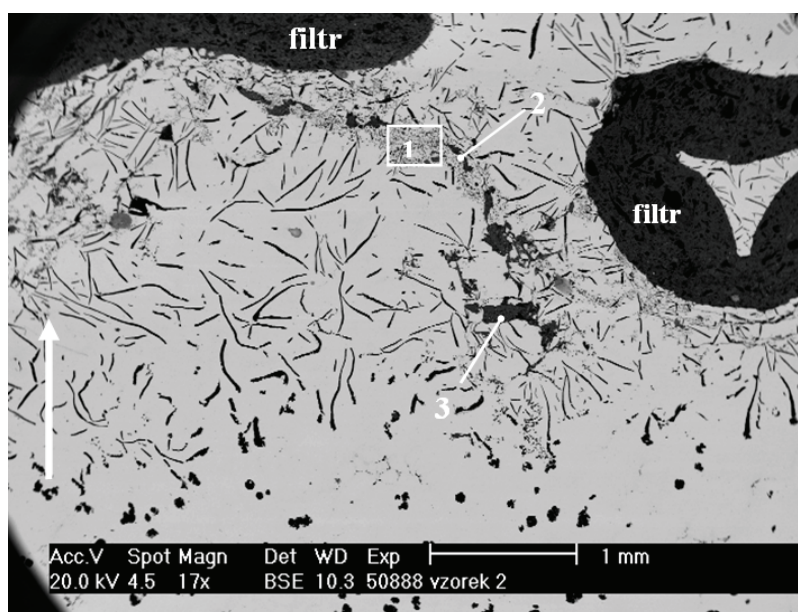
**Obr. 50** - „Lamelární struktura“, dále od ní klesá koncentrace manganu a zvyšuje se koncentrace niklu [46]



vz. 2- před filtrem		Identifikované prvky v atomových %											
Snímek	Místo	N	O	Mg	Si	P	S	Sb	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
50902	1	-	35,75	28,33	1,54	1,01	-	1,73	-	-	1,77	26,84	3,03
	2	22,20	-	9,44	0,63	-	0,47	-	50,43	-	1,22	13,96	1,65
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	0,96	15,39	78,68	4,96

**Obr. 51** - Zvýšený obsah manganu na hranicích zrn [46]

**Hranice filtru** - je zachycena na *obr. 52*. Zde je dobře patrná změna kuličkového grafitu v kovu před filtrem v lupínkový grafit uvnitř filtru. Je zde také vidět filtrační koláč se zachycenými jemnými vměstky na povrchu filtru. Vměstky byly nejčastěji na bázi oxidů a sulfidů hořčíku příp. vápníku.

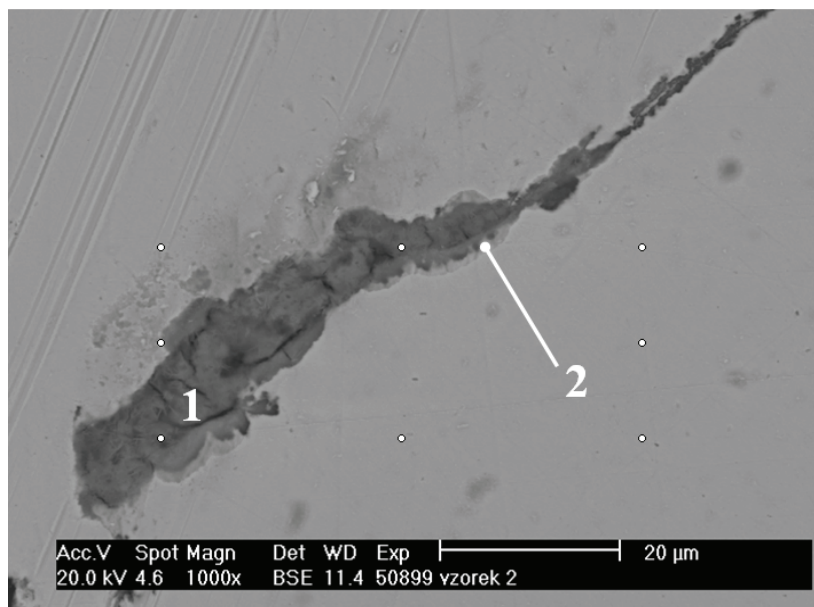


vz. 2- rozhraní		Identifikované prvky v atomových %									
Snímek	Místo	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe	Ni
50888	1 pl. an.	-	20,43	14,78	-	2,42	2,26	0,62	2,01	46,06	11,41
	2	62,98	22,85	7,14	0,92	0,28	1,51	2,09	0,32	1,53	0,38
	3	48,27	36,84	0,76	-	12,34	0,75	0,53	-	0,51	-

**Obr. 52** - Rozhraní mezi filtrem a kovem před ním, šipka naznačuje směr proudění kovu [46]

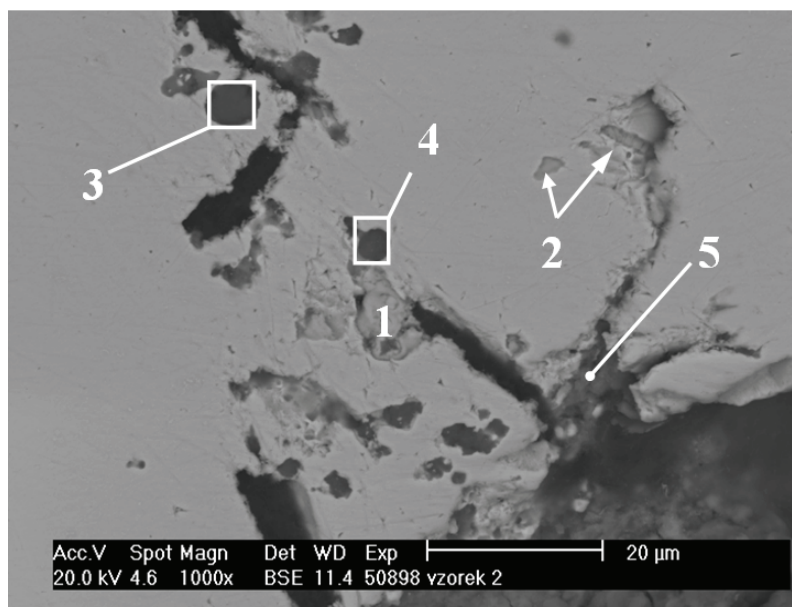
**Uvnitř filtru** byly nalezeny oxidy s vysokým obsahem železa, které mohly mít původ v reoxidaci taveniny (viz *obr. 53*). Oxidy železa zachycené na filtrech byly pozorovány rovněž v práci [47]. Morfologie grafitu zde odpovídala tavenině, která při tuhnutí obsahovala nízkou koncentraci hořčíku. Ve vměstcích se vyskytoval jako dominantní dezoxidační prvek hliník (viz *obr. 54*). Místa obohacená niklem obsahovala vysoké koncentrace síry. To také svědčí o nízké aktivitě hořčíku v tavenině během tuhnutí, protože při vyšším obsahu hořčíku by tento se sírou reagoval za vzniku sulfidů MgS.





vz. 2- ve filtru		Identifikované prvky v atomových %					
Snímek	Místo	O	Si	S	Mn	Fe	Ni
50899	1	51,30	3,23	4,89	0,39	32,80	7,39
	2	24,77	2,96	3,08	1,56	49,86	17,76

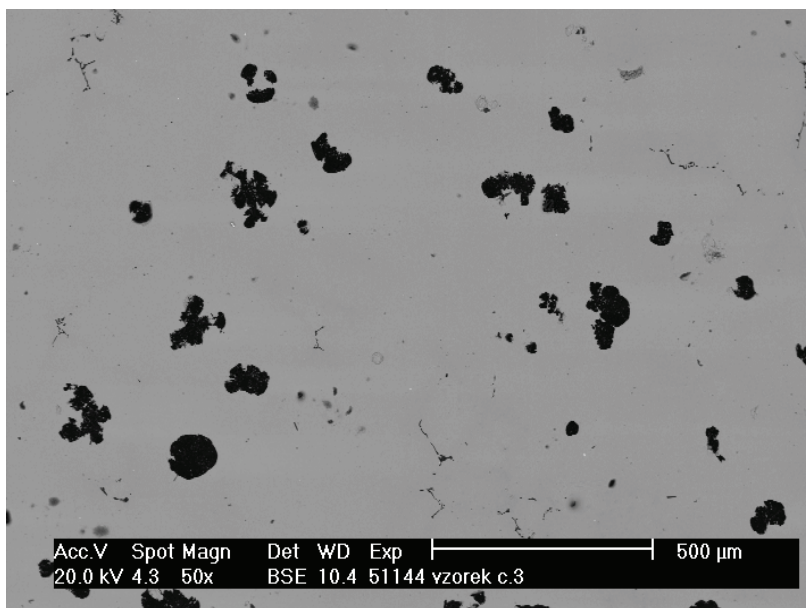
**Obr. 53** - Oxid s vysokým obsahem železa [46]



vz. 2- ve filtru		Identifikované prvky v atomových %								
Snímek	Místo	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe	Ni
50898	1	15,88	4,25	1,31	1,84	28,79	-	0,71	7,06	40,16
	2	16,95	-	-	2,47	14,68	-	1,08	33,54	31,27
	3 pl. an.	45,83	25,74	22,33	0,50	1,31	1,08	0,28	2,34	0,58
	4 pl. an.	42,77	41,58	8,01	0,41	1,20	0,81	0,24	3,65	1,34
	5	33,00	12,66	9,31	5,33	1,84	-	1,46	32,04	4,36

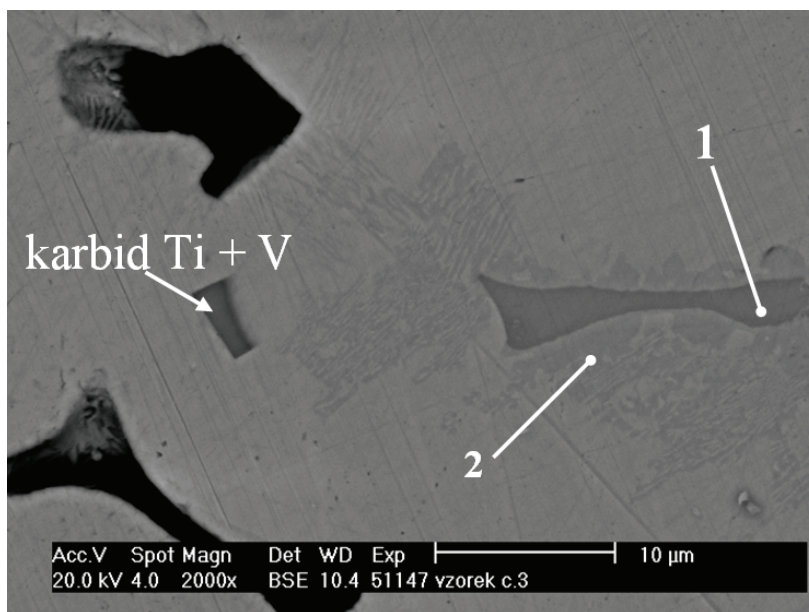
**Obr. 54** - Vměstky s vysokou koncentrací niklu a síry a produkty dezoxidace hliníkem [46]

**Za filtrem (0-30mm)** - v materiálu byly pozorovány četné řediny (viz obr. 55).



**Obr. 55** - Velké množství ředin v kovu (asi 8 mm za filtrem) [46]

*Obr. 56* ukazuje částici bohatou na fosfor a mangan. V okolním kovu je vysoká koncentrace manganu. Za filtrem byly také nalezeny četné oxidy hořčíku a hliníku dislokované do ředin. V některých místech byly po hranicích zrn vyloučeny fáze bohaté na hořčík, mangan a fosfor s místně vyloučenými oxidy hořčíku (část hořčíku byla nahrazena hliníkem, křemíkem a vápníkem) a karbidy, především titanu a vanadu.



vz. 3		Identifikované prvky v atomových %							
Snímek	Místo	C	Si	P	V	Cr	Mn	Fe	Ni
51147	1	?	-	35,09	1,30	1,85	22,89	28,74	10,13
	2	?	3,42	3,70	-	1,10	14,89	60,77	16,12

? značí, že uhlík byl v daném místě identifikován, avšak přístroj neumožňuje určit jeho přesnou koncentraci

**Obr. 56** - Částice s vysokým obsahem P a Mn [46]

### 5.6.3 Diskuze výsledků filtrace ANL

Pozorováním pod světelným mikroskopem bylo zjištěno, že litina uvnitř filtru ztuhla s grafitem vyloučeným ve formě lupínků. Vysvětlení pravděpodobně spočívá v tom, že se ve filtru zachytily produkty reoxidace litiny s vysokou aktivitou FeO, které během chladnutí a tuhnutí oxidovaly okolní taveninu. Tuto teorii by potvrzovaly i analýzy vměstků uvnitř filtru a částečně i za ním, kde byly nalezeny oxidy nejen hořčíku, ale i vápníku a zejména hliníku a dále velké vměstky s vysokou aktivitou FeO. To naznačuje tomu, že po vyčerpání hořčíku začal jako dominantní dezoxidační prvek fungovat hliník. Teorii nedostatku hořčíku uvnitř filtru dále potvrzují nalezené segregace bohaté na nikl a síru. Při koncentraci hořčíku nutné pro modifikaci by totiž prakticky všechna síra zreagovala s hořčíkem na MgS a nevázala by se na nikl.

Dále bylo zjištěno, že kov obsahuje značné množství ředin. Jejich množství se nijak významně neliší před filtrem ani za ním. Téměř všechny řediny, místa posledního tuhnutí, obsahují uvnitř oxidy hořčíku. V bezprostřední blízkosti těchto ředin, po hranicích zrn, byl zjištěn zvýšený obsah zejména manganu (i přes 20 at.%), dále pak niklu a hořčíku. Jedná se pravděpodobně o segregace do míst posledního tuhnutí. Na mnoha místech s vysokou koncentrací manganu a nižším obsahem niklu byla pozorována „zvlněná lamelární struktura“ sestávající z tmavých a světlých lamel, přičemž zejména tmavé vykazují vysoký obsah manganu. Oblasti obsahující tuto „lamelární strukturu“ mají velikost přibližně do 0,1mm. V některých segregacích byl nalezen také zvýšený obsah fosforu (až 6,65 at.%).

Z vměstků zachycených ve filtračním koláči, příp. v objemu filtru se nejčastěji jednalo o shluky jemných vměstků na bázi oxidů a sulfidů hořčíku a vápníku. Místně byly nalezeny komplexní karbidy popř. karbonitridy zejména titanu a dále wolframu, vanadu, niobu, zirkonia, molybdenu apod. Ojedinele byla také nalezena zrnka ostriva  $\text{SiO}_2$ .

Z výsledků analýz vyplývá, že filtrace taveniny nepřinesla v tomto případě jasný a přesvědčivý výsledek o účinném zachycování vměstků a částeczek pocházejících ze vtokové soustavy. Množství zachycených částic bylo minimální a většinu tvořily oxidy či sulfidy hořčíku a dalších prvků pocházejících z modifikátoru a očkovačla s vysokou afinitou ke kyslíku a síře.

## 6 SHRNUÍ PRÁCE

Cílem práce bylo upřesnit a doplnit data potřebná k řízení technologie výroby těžkých odlitků z ANL ve fázi výroby tekutého kovu a odlévání. Jedním z hlavních cílů bylo stanovení eutektické teploty a teploty likvidu u ANL, což jsou vysokolegované litiny s kuličkovým grafitem. Hlavním legujícím prvkem je nikl a díky tomu má tento materiál i při pokojové teplotě austenitickou matici. A právě austenitická matrice je hlavním důvodem, proč je důležité přesně znát teplotu likvidu a na jejím základě pak stanovit optimální odpichovou a lící teplotu. Odlévání bez zbytečného přehřívání taveniny je totiž u těchto nepolymorfních materiálů prakticky jedinou možností, jak zabránit vzniku příliš hrubozrnné struktury.

Při stanovení teploty likvidu a eutektické teploty se vycházelo jednak z údajů uvedených v literatuře, jednak z experimentálních měření. První fáze experimentů měla za cíl stanovení vlivu jednotlivých hlavních legujících prvků na teplotu likvidu a eutektickou teplotu. Těmito hlavními legujícími prvky u ANL jsou uhlík, křemík a nikl.

- Z experimentů vyplynulo, že vliv uhlíku na teplotu likvidu lze vyjádřit rovnicí (18). Z té pak plyne, že uhlík snižuje teplotu likvidu o  $87^{\circ}\text{C}$  na 1 % C. Vliv na eutektickou teplotu lze popsat rovnicí (19) a z té pak vyplývá, že uhlík zvyšuje eutektickou teplotu o  $17,25^{\circ}\text{C}$  na 1 % C.
- Co se týká vlivu niklu na teplotu likvidu a eutektickou teplotu, pak tento lze popsat rovnicemi (20) resp. (21). Z těchto vztahů vyplývá, že nikl snižuje teplotu likvidu o  $1,47^{\circ}\text{C}$  a zvyšuje eutektickou teplotu o  $3,71^{\circ}\text{C}$  na každé procento niklu.
- Při experimentech na zjištění vlivu křemíku byla u některých vzorků, vlivem vysokého obsahu křemíku, překročena eutektická koncentrace. Z tohoto důvodu byl vliv křemíku na teplotu likvidu rozdělen na dvě části, a to na vliv v podeutektické oblasti a v nadeutektické oblasti. V podeutektické oblasti pak lze vliv křemíku na teplotu likvidu vyjádřit rovnicí (26), ze které plyne, že křemík snižuje teplotu likvidu o  $31,32^{\circ}\text{C}$  na každé procento. Vliv na teplotu likvidu v nadeutektické oblasti pak lze vyjádřit rovnicí (25), podle které každé procento křemíku zvyšuje teplotu likvidu o  $92,5^{\circ}\text{C}$ . A co se týká vlivu křemíku na eutektickou teplotu, ten je vyjádřen rovnicí (27). Jedná se o polynom druhého stupně, ze kterého je patrné, že s rostoucí koncentrací křemíku zpočátku eutektická teplota mírně roste a po dosažení lokálního maxima při obsahu křemíku 2,03 % a eutektické teplotě  $1196,1^{\circ}\text{C}$  o něco výrazněji klesá dolů, až na eutektickou teplotu  $1172^{\circ}\text{C}$  při obsahu 5,5 % křemíku. Od lokálního maxima dále směrem k vyšším koncentracím křemíku činí pokles eutektické teploty přibližně  $7,7^{\circ}\text{C}$  na každé procento křemíku.

Pro postihnutí komplexního vlivu těchto tří prvků na teplotu likvidu a eutektickou teplotu byly v práci zvoleny dva přístupy. Prvním byla regresní analýza souboru dat získaných při výše popsaných experimentálních taveb za účelem zjištění vlivu uhlíku, křemíku a niklu. Takto byly stanoveny vzorce (28) a (29) umožňující na základě chemického složení tavby vypočítat teplotu likvidu resp. eutektickou teplotu pro danou konkrétní ANL. Pro rovnici (28) je  $R^2 = 97,65\%$  a pro rovnici (29) je  $R^2 = 94,95\%$ . Obě rovnice jsou platné pro rozmezí prvků uvedené v *tab. 16*. Druhým přístupem pak byl statistický plánovaný experiment. Byla provedena série plánovaných experimentálních taveb, po jejichž vyhodnocení byly stanoveny vzorce (30) a (31) pro výpočet eutektické teploty resp. teploty likvidu na základě chemického složení litiny. Koeficienty determinace jsou  $R^2 = 92,4\%$  pro rovnici (30) a  $R^2 = 95,22\%$  pro vztah (31). Platnost těchto dvou vzorců je pro materiály chemickým složením odpovídající *tab. 21*. Po



porovnání výstupů z těchto dvou metod experimentálního stanovení teplot likvidu a eutektických teplot byly jako vhodnější vyhodnoceny výsledky získané pomocí regresní analýzy, tedy vzorce (28) a (29). Důvodem je především dosahování o něco vyšší přesnosti vypočtených teplot.

Další část práce byla věnována stanovení eutektické koncentrace uhlíku a výpočtu uhlíkového ekvivalentu. Pro výpočet eutektické koncentrace uhlíku byl použit termodynamický model a pro výpočet uhlíkového ekvivalentu vztahy (4), (9) a (10) uvedené v literatuře. Ověřována byla vhodnost použití těchto vzorců pro výpočet uhlíkového ekvivalentu ANL. Bylo zjištěno, že:

- Vzorec (10) je možné pro výpočet uhlíkového ekvivalentu ANL použít, ale pouze u značek s nižším obsahem legujících prvků, typicky např. pro materiály typu D2. Při použití u materiálu s vysokým obsahem legujících prvků je již výsledek zatížen značnou chybou.
- Vzorec (9) je určen pro výpočet uhlíkového ekvivalentu u materiálů odpovídajících značce D5-S, leží-li tedy chemické složení litiny v mezích daných *tab. 5*, jsou vypočtené výsledky velmi přesné. Pokud jsou však mimo toto rozmezí, může být výsledek značně zkreslený. Navíc tento vzorec má jistou nevýhodu v tom, že je nutné znát teplotu likvidu materiálu, jehož uhlíkový ekvivalent chceme počítat.
- Jako nejvhodnější se tedy pro stanovení uhlíkového ekvivalentu ANL jeví v literatuře nejčastěji, a prakticky výhradně, uváděný vzorec (4) uvažující vliv uhlíku, křemíku a niklu. Nicméně za výše uvedených omezujících podmínek je samozřejmě možno použít i vzorce (9) a (10).

Dalším důležitým cílem bylo zmíněné stanovení eutektické koncentrace uhlíku pro libovolné chemické složení litiny. To umožní nastavit koncentraci uhlíku vždy tak, aby bylo chemické složení tavby přibližně eutektické, což zajišťuje optimální slévárensko-technologické vlastnosti. Byl zvolen přístup pomocí termodynamického výpočtu. Ten vychází z termodynamické rovnováhy aktivity uhlíku při eutektické teplotě, kdy je Raoultova aktivita uhlíku v tavenině v rovnováze s vylučujícím se grafitem a je rovna jedné. Toto platí jak v jednoduché soustavě Fe-C tak i v soustavě typu Fe-C-Si-Ni-...-Me odpovídající ANL. Na základě této úvahy a z ní vyplývající rovnice (14) pak lze vypočítat eutektickou koncentraci uhlíku pro libovolné chemické složení ANL. Z provedeného porovnání termodynamického modelu s výše uvedenými rovnicemi pro výpočet uhlíkového ekvivalentu vyplývá, že použití těchto rovnic má omezení dané chemickým složením litiny, které termodynamický model nemá a zejména při legování litiny chromem a mědí mohou vzniknout při použití rovnic pro výpočet uhlíkového ekvivalentu nepřijatelné chyby.

S použitím výsledků výše zmíněných experimentů byl následně sestaven počítačový program s názvem *Výpočet licí teploty litin Ni-resist*, který po zadání chemického složení tavby, požadovaného přehřátí kovu a ztráty teploty kovu v pánvi vypočte důležité metalurgické parametry, které je nutné při odlévání jakostních odlitků z ANL znát a řídit. Jsou jimi eutektická teplota, teplota likvidu a na jejím základě pak teploty odpichová a licí. Dále pak eutektická koncentrace uhlíku, uhlíkový ekvivalent, niklový ekvivalent a kritérium pro vznik chunky grafitu. Tento program je k dispozici na CD, jako příloha 2 této práce. Popis ovládání tohoto programu je uveden v kapitole 5.5, ale je i součástí vlastního programu, takže si jej uživatel může kdykoliv zobrazit.

Posledním z cílů pak bylo prakticky vyzkoušet a následně posoudit účinnost a účelnost použití filtrace při odlévání odlitků z ANL. Byl proveden poloprovozní experiment, při němž byly ve vtokové soustavě odlitu z ANL použity dva pěnové keramické filtry o pórovitosti 10 ppi. Surová hmotnost odlitku činila 920 kg, každým z filtrů tedy proteklo přibližně 450 kg kovu. Následně byl filtr rozřezán a zkoumán pomocí světelného mikroskopu a rastrovacího elektronového mikroskopu s energiově disperzním analyzátozem – EDAX.

- Bylo zjištěno, že ačkoliv v odlitku i ve vtokové soustavě se nacházel kuličkový grafit, kov uvnitř filtru ztuhnul s grafitem vyloučeným ve formě lupínků. Důvodem mohou být vměstky s vysokou aktivitou FeO, pravděpodobně pocházející z reoxidace litiny, které byly pozorovány ve filtru. Během tuhnutí a chladnutí pak kyslík z těchto vměstků oxidoval hořčík potřebný pro modifikaci. Tuto teorii by potvrzovaly i četné oxidy hořčíku, vápníku a hliníku nalezené v objemu filtru a částečně i za ním. Dalším důkazem podporujícím tuto teorii by mohly být nalezené segregace bohaté na nikl a síru. V případě, že by byl v tavenině přítomen hořčík, obsažená síra by s ním okamžitě reagovala za vzniku MgS a nevázala by se na nikl.
- Na čele filtru byl pozorován tenký filtrační koláč o tloušťce přibližně 0,5 mm. Vměstky zachycené v tomto filtračním koláči byly nejčastěji na bázi oxidů příp. sulfidů hořčíku a vápníku. Místně byly nalezeny komplexní karbidy popř. karbonitridy zejména titanu a dále wolframu, vanadu, niobu, zirkonia, molybdenu apod. Ojediněle byla také nalezena zrnka ostřiva SiO<sub>2</sub>.
- Z výsledků analýz vyplývá, že filtrace taveniny nepřinesla v tomto případě jasný a přesvědčivý výsledek o účinném zachycování vměstků a částeczek pocházejících ze vtokové soustavy. Množství zachycených částic bylo minimální a většinu tvořily oxidy či sulfidy hořčíku a dalších prvků pocházejících z modifikátoru a očkovačla s vysokou afinitou ke kyslíku a síře.

Jedním z nejdůležitějších výstupů této práce je však zmíněný program *Výpočet lici teploty litin Ni-resist*, který umožňuje i v provozních podmínkách slévárny jednoduchým a rychlým zadáním chemického složení tavby okamžitě zjistit všechny důležité parametry potřebné pro výrobu jakostních odlitků z ANL. V současné době je již tento program využíván ve slévárně Žďas a.s., kde umožňuje minimalizovat množství metalurgických vad, což u materiálů jakými jsou ANL vede k nemalým finančním úsporám.



## 7 LITERATURA

- [1] APTEKAR', L. I., ABRAMENKO, Yu. E. Structure and properties of austenitic nickel cast irons. *Metal Science and Heat Treatment*, 1977, vol. 19, no. 4, p. 280–292.
- [2] SÝKORA, P. Metalurgie výroby austenitické litiny s kuličkovým grafitem. *Slévárenská ročenka*; 2000; p. 141–156.
- [3] MORRISON, J., C.; RÖHRING, K. Erzeugung von Gußstücken aus austenitischen Gußeisen (Ni-Resist). *Gießerei-Praxis* 1997, 17-18, p. 361–372.
- [4] MORRISON, J. C.; COVERT, R.; SPEAR, W. Ni-Resist and Ductile Ni-Resist Alloys. Nickel Development Institute, 1998. Reference Book Series No. 11018.
- [5] RÖHRING, K. Austenitisches Gußeisen – Eigenschaften und Anwendung. *Konstruieren + Giessen* 1993, 18 (3), p. 4-29.
- [6] ROHRING, K.: Austenitische Gusseisen. *Konstruieren + Giessen* 2004, 29 (2), s. 2–33.
- [7] VORONENKO, B. I., ROMATOVSKII, Yu. I. Properties and use of austenitic nickel cast irons with spheroidal graphite. *Metalloved. Term. Obrab. Met.*, 1988, , no. 4, p. 32–41.
- [8] CHENTSOV, Yu. N. Effect of heat treatment on structure and properties of austenitic iron. *Metal Science and Heat Treatment*, 1981, vol. 23, no. 1, p. 69–72.
- [9] COX, G. J. The effect of elevated temperatures on the constitution and properties of spheroidal graphite, austenitic cast irons. *British foundryman*, 1974, vol. 67, no. 11, p. 295–311.
- [10] ABRAMENKO, Yu. E., APTEKAR', L. I., TISKOVICH, N. L. Conditions of stability of the structure of Ni-resist alloys. *Metal Science and Heat Treatment*, 1978, vol. 20, no. 6, p. 494–497.
- [11] TORKINGTON, D., I. Anchnitt- und Speisertechnik bei austenitischen Gußeisen mit Kugelgraphit. *Giesserei-Praxis* 1980, 1-2, p. 13-18.
- [12] BŮŽEK, Z. Základní termodynamické údaje o metalurgických reakcích a o interakcích prvků v soustavách významných pro hutnickou teorii a praxi. *Hutnické aktuality*. 1979, 20, 1 a 2, p. 91-95.
- [13] MAMPEY, F. Solidification and feeding behavior of austenitic cast iron. *AFS Transactions*; 2002; p. 869–888.
- [14] SCHELLENG, R. D. Influence of nickel up to 37 per cent and silicon up to 3 per cent on the eutectic carbon content of cast iron. *Modern castings*, 1960, vol. 37, no. 6, p. 87–89.
- [15] MORRISON, J., C. Ductile Ni-Resist Type S2W – Aspects of Composition and Heat Treatment on the Production of Castings for Sea Water Service. *Gießerei-Praxis* 1997, 1-2, p. 6-18.
- [16] LARRANAGA, P, et al. Effect of Antimony and Cerium on the Formation of Chunky Graphite during Solidification of Heavy-Section Castings of Near-Eutectic Spheroidal Graphite Irons. *Metallurgical and materials transactions A*. 2009, 40A, p. 654-661.
- [17] KÄLLBOM, R., et al. On the solidification sequence of ductile iron castings containing chunky graphite. *Mater. Sci. Eng., A*, 2005, vol. 413-414, p. 346–351.
- [18] LIU, P. C., et al. SEM study of chunky graphite in heavy section ductile iron. *AFS Transactions*, 1983, vol. 91, p. 119–126.
- [19] ROUČKA, J. *Metalurgie litin*. 1st ed. Brno: PC-DIR Real s.r.o., 1998. ISBN 80-214-1263-1.
- [20] ITOFUJI, H., UCHIKAWA, H. Formation mechanism of chunky graphite in heavy-section ductile cast iron. *AFS Transactions*, 1990, vol. 98, p. 429–448.
- [21] CAMPBELL, J. A Hypothesis for Cast Iron Microstructures. *Metallurgical and materials transactions B*, 2009, vol. 40B, p. 786–801.

- [22] FRANSON, A. I., SCHELLENG, R. D. Composition effect on mechanical properties of austenitic ductile iron containing about 20% nickel. *AFS Transactions*, 1962, vol. 70, p. 1095–1100.
- [23] GAGNÉ, M., LABRECQUE, C., JAVAID, A. Effect of wall thickness on the graphite morphology and properties of D5-S austenitic ductile iron. *AFS transactions*, 2007, vol. 115, p. 411–421.
- [24] KAŇA, V. Research and starting the production of heavy castings from high-alloy ductile cast iron. In *45th Foundry Days and 5th International PhD Foundry Conference*, 2008. ISBN 978-80-214-3646-6.
- [25] SPEAR, W. M. High Silicon Austenitic Ductile Iron in Elevated Temperature Service. In *Advanced Casting Technology: Proceedings of an International Conference on Advanced Casting Technology, Kalamazoo, Michigan, USA 12-14 Nov 1986*. 1987, p. 129–134. ISBN 978-08-717-0277-7.
- [26] WHITTLE, R. D. T., SCOTT, V. D. Improving the Wear Resistance of Austenitic Alloys by Surface Treatment. *Transaction of the ASME*, 1985, vol. 107, no. 2, p. 180–187.
- [27] ZÁDĚRA, A., et al. Upřesnění podmínek pro odlévání austenitických niklových litin. In *XVIII. celostátní konference Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a litiny s kuličkovým grafitem*, 2008. p. 180–187. ISBN 978-80-02-02075-2.
- [28] *Chemsoc.velp.info* [online]. 2011 [cit. 2011-05-10]. Phase diagram [Fe-Ni]. Dostupné z WWW: <<http://chemsoc.velp.info/alloys.php?elementno=26&index=11>>.
- [29] *Chemsoc.velp.info* [online]. 2011 [cit. 2011-05-10]. Phase diagram [Fe-Si]. Dostupné z WWW: <<http://chemsoc.velp.info/alloys.php?elementno=26&index=15>>.
- [30] *Chemsoc.velp.info* [online]. 2011 [cit. 2011-05-10]. Phase diagram [ni\_si]. Dostupné z WWW: <<http://chemsoc.velp.info/alloys.php?elementno=28&index=17>>.
- [31] RAYNOR, G. V., RIVLIN, V. G. *Phase Equilibria Iron Ternary Alloys*. London: Inst. Met., 1988. C-Fe-Ni, p. 192–200.
- [32] RAGHAVAN, V. C-Fe-Ni (Carbon-Iron-Nickel). *Journal of Phase Equilibria*, 1994, vol. 15, no. 4, p. 428–429.
- [33] BUCKLEY, R. A., HUME-ROTHERY, W. Liquidus and solidus relations in iron-rich iron-carbon-nickel alloys. *Journal of the iron and steel institute (London)*, 1964, p. 895–898.
- [34] ROMIG, A. D. Jr, GOLDSTEIN, J. I. Determination of the Fe-Rich Portion of the Fe-Ni-C Phase Diagram. *Metallurgical transactions A*, 1977, vol. 9, p. 1599–1609.
- [35] WADA, T., et al. Thermodynamics of the Fcc Fe–Ni–C and Ni–C alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1971, vol. 2, no. 8, p. 2199–2208.
- [36] POKORNÁ, A., VŘEŠŤÁL, J. Teplotní závislost interakce niklu s uhlíkem v  $\gamma$ -železe. *Kovové materiály*, 1986, vol. 24, no. 5, p. 611–616.
- [37] ACKERBAUER, S., et al. The constitution of the ternary system Fe–Ni–Si. *Intermetallics*, 2009, vol. 17, p. 414–420.
- [38] HUA, Q., ZHANG, Y., YAN, Y. On-line prediction of carbon equivalent on high-nickel austenitic ductile iron. *Mater. Sci. Eng., A*, 2005, vol. 393, no. 1-2, p. 310–314.
- [39] SIL'MAN, G. I. Carbon equivalents of elements in cast iron. *Metal science and heat treatment*, 2002, vol. 44, no. 1-2, p. 28–31.
- [40] FATAHALLA, N., ABUELEZZ, A., SEMEIDA, M. C, Si and Ni as alloying elements to vary carbon equivalent of austenitic ductile cast iron: Microstructure and mechanical properties. *Mater. Sci. Eng., A*, 2009, vol. 504, p. 81–89.
- [41] ROUČKA, J., et al. *Příručka o filtraci*. Brno, 2000. ISBN 80-02-01389-1.

- [42] *Pyrotek - Foundry Solutions* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Refractory cloth for molten metal filtration. Dostupné z WWW: <[http://www.pyrotek.info/documents/datasheets/154\\_-\\_Glasweve\\_HT\\_-\\_E4.pdf](http://www.pyrotek.info/documents/datasheets/154_-_Glasweve_HT_-_E4.pdf)>.
- [43] *Hofmann ceramic* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Foundry Ceramics - Casting filters - Round-hole filters. Dostupné z WWW: <<http://www.hofmann-ceramic.de/index.php/round-hole-filters.html>>.
- [44] *Slevarenske-naradi.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Pěnové keramické filtry FCF. Dostupné z WWW: <[http://www.slevarenske-naradi.cz/keramicke\\_filtry.pdf](http://www.slevarenske-naradi.cz/keramicke_filtry.pdf)>.
- [45] KRUTIŠ, V. *Vliv tepelného ošetření nálitků na tuhnutí kovu. Disertační práce*. Brno, 2003. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jaromír Roučka.
- [46] KAŇA, V., et al. Výsledky filtrace odlitků z austenitických Ni litin. In *XVIII. celostátní konference Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a litiny s kuličkovým grafitem*. 2008, ISBN 978-80-02-02075-2.
- [47] STRÁNSKÝ, K., BAŽAN, J., HORÁKOVÁ, D. *Filtrace tavenin železa v průmyslové praxi*. 1st ed. Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1844-3.

## 8 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 – Souhrnná tabulka odlitých taveb Ni-resist

PŘÍLOHA 2 – Program *Výpočet lící teploty litin Ni-resist* (na přiloženém CD)

## 9 POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY

zkratka/symbol	jednotka	význam
%i	[%]	koncentrace i-tého prvku
A	[%]	tažnost
$a_C^{Fe-C} = a_C^{Fe-C-...-Me}$	[-]	aktivita uhlíku v soustavě Fe-C a v soustavě Fe-C-...-Me
ANL	-	austenitické niklové litiny
at.%	-	atomové procento
C <sub>e</sub>	[-]	uhlíkový ekvivalent
csi	[1]	počet otvorů na čtvereční palec u extrudovaného filtru
fcc	-	plošně středěná kubická mřížka
f <sub>M</sub>	[-]	faktor posunu modulu
$G_C^i$	[-]	uhlíkový ekvivalent i-tého prvku
HB	[-]	tvrdost podle Brinella
hm.%	-	hmotnostní procento
KVZ	-	kovy vzácných zemin
L	-	tavenina
LKG	-	litina s kuličkovým grafitem
LLG	-	litina s lupínkovým grafitem
M <sub>iz.</sub>	[cm]	modul odlitku bez tepelné izolace
M <sub>neiz.</sub>	[cm]	modul odlitku s tepelnou izolací
M <sub>S</sub>	[°C]	teplota martenzit start
Ni <sub>ekv.</sub>	[-]	niklový ekvivalent
$N_C^{Fe-C}, N_C^{Fe-C-...-Me}$	[-]	atomový zlomek uhlíku v soustavě Fe-C a v soustavě Fe-C-...-Me
pl. an.	-	plošná analýza chemického složení
ppi	[-]	počet pórů na délkový palec u pěnového filtru
R <sup>2</sup>	[%]	koeficient determinace
R <sub>m</sub>	[MPa]	pevnost v tahu
R <sub>p0,2</sub>	[MPa]	mez kluzu
T <sub>eut.</sub>	[°C]	eutektická teplota
T <sub>lik.</sub>	[°C]	teplota likvidu
VZ.	-	vzorek
$\gamma_C^{Fe-C-...-Me}, \gamma_C^{Fe-C}$	[-]	Raoultův aktivitní koeficient pro uhlík v soustavě Fe-C a v soustavě Fe-C-...-Me
γ, γFe	-	tuhý roztok železa γ
δFe	-	tuhý roztok železa δ
$\varepsilon_C^C, \varepsilon_C^{Me}$	[-]	interakční koeficienty vlivu C a prvků Me na aktivitu uhlíku